

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:
**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA EXTRUSORA
PARA FUNDIR PLÁSTICO PET RECICLABLE CON CAPACIDAD DE 5KG/H”**

AUTORES:
DAVID ANDRÉS CAMPOS MOSCOSO
EDWIN EMILIO CARAGUAY PULLAGUARI

TUTOR:
QUITIAQUEZ SARSOZA, RENÉ PATRICIO

Quito, agosto 2021

CESIÓN DE DERECHO DE AUTOR

Nosotros David Andrés Campos Moscoso y Edwin Emilio Caraguay Pullaguari con documentos de identificación N° 171583677-9 y 171425548-4 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA EXTRUSORA PARA FUNDIR PLÁSTICO PET RECICLABLE CON CAPACIDAD DE 5KG/H”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

David Andrés Campos Moscoso
171583677-9

Edwin Emilio Caraguay Pullaguari
171425548-4

Quito, agosto del 2021

DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Quitiaquez Sarsoza, René Patricio declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA EXTRUSORA PARA FUNDIR PLÁSTICO PET RECICLABLE CON CAPACIDAD DE 5KG/H”, realizado por David Andrés Campos Moscoso y Edwin Emilio Caraguay Pullaguari, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.



Quitiaquez Sarsoza, René Patricio

C.I. 171059726-9

Quito, agosto del 2021

DEDICATORIA

A Dios por haberme acompañado en cada momento de mi vida, a mi mamá Carmen Amelia, mi hermano Daniel C, mi hermana Alejandra por apoyarme incondicionalmente en todo momento de mi vida, sin ellos no hubiese sido posible éste logro, ya que, con su paciencia y su amor han sido pilares fundamentales en mi carrera, a mi novia Belén G. que ha sido mi compañera, amiga y aliento en momentos donde necesitaba ánimos para continuar.

David Campos

El presente proyecto lo dedico con el corazón, al creador de la vida, por estar presente en cada paso que doy, a mi madre Dalila Pullaguari por enseñarme el valor de las palabras “tu puedes hacerlo”, que me acompañaron en toda la carrera y en la vida, a mi esposa, amiga y compañera Digna Torres, por sus consejos, su ayuda y palabras de ánimo cuando más lo necesitada, a mi padre Víctor Caraguay por sus palabras y ánimos, a mis hermanos Héctor Caraguay y esposa, Melania Caraguay y esposo por estar siempre a mi lado en este camino, a Jesús por escucharme, darme fuerzas y animo cada día, por ser un amigo incondicional y permitirme gozar de su compañía.

Emilio Caraguay

AGRADECIMIENTOS

A cada docente de la UPS que ha impartido su conocimiento y su experiencia y ha sabido guiarnos, al Ing. Henry Yandún por haberme permitido formar parte de su empresa Kubiec, y hacer posible este sueño, siempre será un ejemplo a seguir, a mi jefa Ing. Olivia Diaz, Gabriela M. y Jenny Gallardo, amigas y compañeras del trabajo quienes siempre con sus palabras de aliento, motivación y su apoyo incondicional permitieron cumplir una meta más en mi vida, a mi compañero de tesis Emilio que hemos logrado trabajar en equipo y concluir la tesis, a nuestro tutor el Ing. Patricio Quitiaquez, quien nos supo guiar y ayudar en nuestro proyecto de titulación.

David Campos

Agradezco a Dios, a mi madre, a mi esposa, a mi padre, a mi familia, a mis amigos y compañeros de trabajo Ing. Milton Tobar, Ing. Pablo Aria, a Industria Acero de los Andes, por darme la oportunidad de trabajar y estudiar, para hacer realidad este sueño de ser un profesional y un ejemplo en mi familia.

A cada docente de la universidad UPS, que supieron sembrar en mí, los conocimientos necesarios para ser ingeniero mecánico, a mi compañero de tesis David Campos, en especial a mi tutor Ing. Patricio Quitiaquez, quien nos permitió trabajar junto a él y compartió su tiempo y conocimiento para el desarrollo de este proyecto.

Emilio Caraguay

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHO DE AUTOR	i
DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xv
ANTECEDENTES	xv
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvi
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO	1
4.1 Generalidades	1
4.2 Polímeros.....	1
4.2.1 Plásticos	2
4.2.2 Proceso de reciclaje mecánico del PET	3
4.2.3 Elastómeros.....	6
4.2.4 Fibras	6
4.3 Extrusión	7
4.3.1 Equipos utilizados para la extrusión de plásticos	7
4.4 Análisis de alternativas.....	11
4.4.1 Análisis de extrusoras de tornillo.....	11
4.4.2 Análisis de tipo de alimentación	14
4.4.3 Análisis de sistema de potencia	17

4.4.4	Análisis de sistema de calentamiento	20
4.5	Partes principales de una extrusora	22
4.5.1	Tornillo de extrusión.....	22
4.5.2	Cilindro o camisa	23
4.5.3	Tolva de alimentación.....	24
4.5.4	Sistema de atemperado	25
4.5.5	Cabezal y boquilla	25
4.5.6	Plato rompedor.....	26
4.5.7	Motor-reductor.....	27
4.5.8	Sistema de enfriamiento.....	27
4.5.9	Sistema de arrastre	28
4.6	Materiales y accesorios	29
4.6.1	Aceros aleados	29
4.6.2	Aceros al carbono	30
4.7	Soldadura.....	31
4.7.1	Soldadura por electrodo revestido	31
4.7.2	Soldadura por electrodo metálico protegido por gas inerte (GMAW)	32
4.7.3	Electrodo E-6011	32
4.7.4	Electrodo E-7018 / E-4918	33
4.8	Juntas atornilladas	33
CAPÍTULO II.....		34
DISEÑO DE COMPONENTES.....		34
5.1	Generalidades	34
5.2	Diseño del tornillo sin fin.....	35
5.2.1	Diámetro del tornillo extrusor.....	35
5.2.2	Relación L/D	36
5.2.3	Ángulo de hélice (ϕ_B)	36

5.2.4	Paso del husillo (t)	36
5.2.5	Ancho del canal (W)	37
5.2.6	Altura de filete	37
5.2.7	Longitud de las zonas del husillo ($l_{1,2,3}$).....	37
5.3	Cálculo del tornillo sinfín.....	38
5.3.1	Análisis de esfuerzos del tornillo.....	40
5.4	Dimensionamiento del cilindro	45
5.4.1	Tolerancia Tornillo/ cilindro.....	45
5.5	Tolva de alimentación	47
5.6	Sistema de calentamiento	49
5.6.1	Cálculo del coeficiente de convección.....	51
5.6.2	Cálculo del coeficiente de conducción	53
5.6.3	Pérdidas de calor por conducción	54
5.6.4	Pérdidas por convección	54
5.6.5	Pérdidas por radiación	55
5.6.6	Potencia de entrada	55
5.6.7	Potencia de salida del sistema.....	55
5.7	Dimensionamiento de la boquilla.....	56
5.8	Selección de la transmisión de movimiento.....	57
5.9	Diseño de la estructura	58
5.9.1	Dimensionamiento de la estructura.....	60
5.10	Cálculo de la soldadura.....	60
5.11	Selección de termocuplas	61
5.12	Controlador de temperatura	62
CAPÍTULO III		63
VALIDACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS ECONÓMICO		63
6.1	Generalidades	63

6.2	Análisis estático del tornillo	64
6.2.1	Factor de seguridad calculado en Solidworks.....	64
6.3	Análisis estático en la estructura	65
6.4	Pruebas de funcionamiento y toma de resultados	66
6.4.1	Pruebas de funcionamiento	68
6.5	Consumo eléctrico de la máquina	70
6.5.1	Costo de operación.....	70
6.6	Análisis financiero y económico	70
6.6.1	Costos directos	71
6.6.2	Costo de diseño	71
6.6.3	Costo de materia prima	71
6.6.4	Costo de fabricación y mano de obra.....	74
6.6.5	Costos indirectos.....	76
6.6.6	Costos no recuperables	76
6.6.7	Costos de elementos consumibles.....	77
6.7	Análisis financiero.....	77
	Conclusiones.....	79
	Recomendaciones	80
	Referencias	81
	ANEXOS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los polímeros sintéticos	2
Figura 2. Ciclo de reciclaje	4
Figura 3. Ciclo de transformación del RPET	6
Figura 4. Extrusora de tornillo	8
Figura 5. Bomba de extrusión	9
Figura 6. Extrusora de rodillos	10
Figura 7. Partes de una extrusora de tornillo	10
Tabla 2. Caudales para polietileno de baja densidad con sección lisa y acanalada	11
Tabla 3. Caudales de extrusión con una sección de alimentación lisa y acanalada	11
Figura 8. Fases de extrusión	12
Figura 9. Extrusora de doble tornillo	13
Figura 10. Tolva cilíndrica..	15
Figura 11. Tolva cuadrada.....	16
Figura 12. Motor-reductor	18
Figura 13. Motor trifásico	18
Figura 14. Resistencia de chapa abrazadera.....	20
Figura 15. Abrazadera con elementos blindados.....	21
Figura 16. Tornillo extrusor..	22
Figura 17. Diagrama de funciones en las diferentes zonas de extrusión.....	23
Figura 18. Cilindro o camisa..	24
Figura 19. Tolva de alimentación.....	24
Figura 20. Resistencia de calefacción.	25
Figura 21. Cabezal y boquilla.	26
Figura 22. Plato rompedor y filtros..	26
Figura 23. disposición de agujeros en el plato rompedor	27
Figura 24. Circuito de recirculación del agua	28

Figura 25. Sistemas de arrastre	28
Figura 26. Proceso de soldadura por electrodo revestido	31
Figura 27. Proceso de soldadura por electrodo protegido por gas inerte	32
Figura 28. Partes de tornillo extrusor.	35
Figura 29. Desarrollo de una espira de un tornillo	36
Figura 30. Diagrama de fuerzas del husillo	40
Figura 31. Resultados del factor de seguridad del tornillo.	48
Figura 32. Cobertor del sistema de calentamiento.	50
Figura 33. Análisis estático en el perfil de la estructura.....	59
Figura 34. Dimensiones de la estructura principal.	60
Figura 35. Termocupla tipo arandela	62
Figura 36. Controlador de temperatura TX	63
Figura 37. Esfuerzos de Von Mises determinados en el tonillo.	64
Figura 38. Resultados del factor de seguridad del tornillo.	65
Figura 39. Resultados del esfuerzo de flexión en la estructura.	66
Figura 40. Resultados del factor de seguridad en la estructura.	66
Tabla 32. Análisis financiero.	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del PET	4
Tabla 4. Ventajas y desventajas de extrusora de tornillo simple.....	12
Tabla 5. Ventajas y desventajas, extrusora de doble tornillo	13
Tabla 6. Análisis de alternativas entre extrusora de simple y doble husillo.....	14
Tabla 7. Ventajas y desventajas de la tolva cilíndrica.	15
Tabla 8. Ventajas y desventajas de la tolva cuadrada.....	16
Tabla 9. Comparación de alternativas para el sistema de almacenamiento.....	17
Tabla 10. Ventajas y desventajas motor-reductor.....	18
Tabla 11. Ventajas y desventajas de motor trifásico	19
Tabla 12. Comparación de alternativas para el sistema de potencia.	19
Tabla 13. Ventajas y desventajas resistencia de chapa abrazadera.	20
Tabla 14. Ventajas y desventajas abrazadera con elementos blindados.	21
Tabla 15. Comparación de alternativas para el sistema de calentamiento.	21
Tabla 16. Propiedades mecánicas acero AISI P20	29
Tabla 17. Propiedades mecánicas acero AISI 4140	30
Tabla 18. Propiedades mecánicas acero AISI 1045	30
Tabla 19. Propiedades mecánicas acero ASTM A36	31
Tabla 20. Propiedades mecánicas electrodo E-6011	33
Tabla 21. Propiedades mecánicas electrodo E-7018	33
Tabla 22. Valores nominales de limite elástico y resistencia última a la tracción.	33
Tabla 23. Datos de diseño del tornillo sin fin.....	38
Tabla 24. Costo total del diseño de la máquina.	71
Tabla 25. Costo total de materia prima para mecanizado.....	71
Tabla 26. Costo total de materia prima de elementos normalizados	72
Tabla 27. Costo total de materia prima para materiales eléctricos.	73
Tabla 28. Costo total de fabricación y mano de obra.	74

Tabla 29. Costos directos totales de la máquina extrusora	75
Tabla 30. Detalle de costos no recuperables	76
Tabla 31. Costos de elementos consumibles	77

RESUMEN

El primer capítulo trata las definiciones básicas de reciclado y procesamiento, así como los polímeros utilizados en la industria para productos de consumo masivo y su manufactura por los diferentes procesos de inyección y conformado, obteniendo de esta manera un mejor conocimiento de las máquinas y las partes que las componen, para que de esta forma cuantificar, determinar y evaluar los materiales y componentes óptimos para el diseño y construcción de un equipo de inyección de plástico que satisfaga la demanda de 5 kg /h.

En la segunda sección se trata las fórmulas que rigen el diseño de un tornillo de extrusión, así como también los componentes que conforman una extrusora de tornillo simple para inyección de polímeros, analizando el comportamiento mecánico, térmico y de control para la transformación del polímero mediante adición de calor.

Mediante los resultados obtenidos con la aplicación de fórmulas se estima el dimensionamiento que tendrá cada componente y escoger los materiales y componentes disponibles en el mercado actual para el correcto funcionamiento y una óptima operatividad y mantenimiento para el usuario.

Para el inicio de los cálculos se toma en consideración el flujo másico de producción el cual es de 5 kg/h y un diámetro nominal del tornillo de 30 [mm].

Lo que corresponde al capítulo III es la validación de los resultados obtenidos en cálculos, mediante un software especializado para determinar el comportamiento del tornillo, sometido a diferentes esfuerzos y de esta manera obtener un factor de seguridad óptimo para el sistema.

También se realizará un análisis financiero para estimar el impacto económico que genera la fabricación de la máquina y su tiempo de recuperación utilizando identificadores financieros como la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN).

Palabras Clave: esfuerzos, extrusión, polímero, térmico, dimensionamiento.

ABSTRACT

The first chapter deals with the basic definitions of recycling and processing, as well as the polymers used in the industry for mass consumption products and their manufacture by the different injection and forming processes, thus obtaining a better knowledge of the machines and parts. That composes them, so that in this way to quantify, determine and evaluate the optimal materials and components for the design and construction of a plastic injection equipment that satisfies the demand of 5 kg / h.

The second section deals with the formulas that govern the design of an extrusion screw, as well as the components that makes up a simple screw extruder for polymer injection, analyzing the mechanical, thermal and control behavior for the transformation of the polymer by means of adding heat.

Through the results obtained with the application of formulas, the dimensioning that each component will have is estimated and the materials and components available in the current market are chosen for correct operation and optimal operation and maintenance for the user.

For the beginning of the calculations, the production mass flow is taken into consideration, which is 5 kg / h and a nominal screw diameter of 30 [mm].

What corresponds to Chapter III is the validation of the results obtained in calculations, using specialized software to determine the behavior of the screw, subjected to different efforts and thus obtain an optimal safety factor for the system.

A financial analysis will also be carried out to determine the economic impact generated by the manufacture of the machine and its recovery time using financial identifiers such as the internal rate of return (IRR) and the net present value (NPV).

Key Words: stress, extrusion, polymer, thermal, sizing.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación trata sobre el diseño y construcción de una máquina extrusora de plástico para extruir filamento utilizado en la impresión 3D, para ello se utilizará las condiciones de diseño planteados en los libros de diseño de elementos de máquinas, con el fin de obtener factores de seguridad aceptables y que permitan un funcionamiento correcto de la extrusora y con una mayor vida útil.

Existen máquinas extrusoras simples (un solo husillo giratorio), de tornillos dobles y triples, en este caso se enfocó en trabajar en una máquina extrusora de tornillo simple con capacidad de extrusión de 5 (kg / h) ideal para materiales termoplásticos, para la construcción del husillo giratorio, se debe considerar utilizar materiales con buena resistencia térmica y al desgaste como es el AISI 4140, el cual se considera conveniente para este tipo de trabajo.

La máquina extrusora consta de tres etapas antes de terminar el proceso de extrusión, en la zona de alimentación se introduce el material a extruir y se lo transporta mediante el movimiento del husillo por medio de los canales los cuales le permiten avanzar hasta la zona de compresión, en esta zona la profundidad del canal es menor logrando de esta manera la compresión del material por lo tanto existe una mayor presión, para luego pasar el proceso de fundido, en esta etapa se realiza el dosificado del plástico fundido, obteniéndose un flujo direccional constante con la forma de la boquilla por donde sale el plástico fundido.

ANTECEDENTES

En la actualidad el uso de plásticos en diversas aplicaciones ha ido aumentando a nivel mundial de manera considerable, es por ello que la mayoría de las industrias se dedican a reciclar y procesar plástico para poder transformarlo en productos nuevos, como es el caso de extrusión de plástico para producir filamento fundido, el cual es utilizado como materia prima por impresoras 3D, las cuales permiten producir diferentes tipos de productos con diversas aplicaciones.

El diseño de una máquina extrusora de plástico para extruir filamento fundido utilizando como materia prima materiales reciclados, permite un ahorro con respecto a los costos de producción de diferentes materiales extruidos como es el caso del PET, PVC y PLA además de la reducción del impacto ambiental, ya que el uso de material reciclado permite reprocesar plásticos que ya han terminado su ciclo de uso para crear un producto nuevo, para ello se plantea como objetivo general: Diseñar y construir un prototipo de máquina extrusora para fundir plástico PET reciclable con capacidad de 5kg/h.

Como objetivos específicos se plantea:

- Analizar e identificar la alternativa más idónea para la extrusión.
- Diseñar y calcular los principales elementos que componen el mecanismo.
- Comparar el rendimiento teórico vs el real del equipo en la capacidad total de funcionamiento.
- Verificar resultados mediante pruebas del equipo.
- Establecer indicadores financieros de desempeño y rentabilidad del proyecto

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Valvulería	Accesorios y elementos auxiliares para válvulas.
Kevlar	Es un material conocido como poliparafenileno tereftalamida, su campo de aplicación está en la fabricación de cables, ropa resistente (de protección) o chalecos antibalas.
Nitruración	Es un tratamiento termoquímico de endurecimiento superficial en donde se incorpora Nitrógeno a la superficie del acero aleado principalmente por fase férrica mediante el calentamiento en una atmosfera de amoníaco.
Pellet	Son pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido de diferentes materiales.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

4.1 Generalidades

En el presente capítulo se trata las definiciones básicas de reciclado y procesamiento, así como los polímeros utilizados en la industria para productos de consumo masivo y su manufactura por los diferentes procesos de inyección y conformado, obteniendo de esta manera un mejor conocimiento de las máquinas y las partes que las componen, para que de esta forma cuantificar, determinar y evaluar los materiales y componentes óptimos para el diseño y construcción de un equipo de inyección de plástico que satisfaga la demanda de 5 kg /h.

4.2 Polímeros

Los polímeros pertenecen a un tipo de macromolécula que se identifica por tener una unidad monomérica que se repite por toda la molécula, los monómeros los cuales son partículas pequeñas combinadas entre sí, mediante una reacción de polimerización dando de esta manera la formación de los polímeros [1].

El estudio de las macromoléculas contempla los materiales de formación biológicas como sintéticas. El grupo de polímeros de procedencia biológica, están por los polisacáridos, como es la celulosa almidón, proteínas y los ácidos nucleicos, siendo estos considerados como polímeros naturales [1].

Gracias al avance tecnológico se ha logrado obtener polímeros sintéticos con diferentes propiedades mecánicas, estos polímeros se pueden clasificar de forma general como se observa en la figura 1 [1].

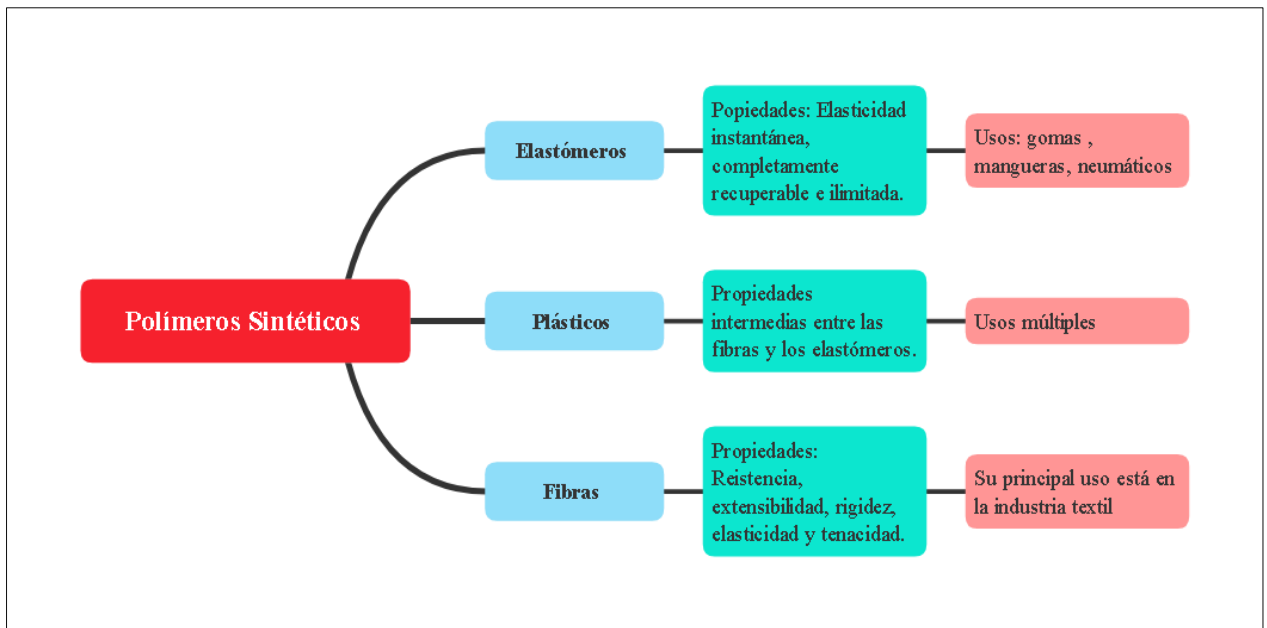


Figura 1. Clasificación de los polímeros sintéticos [1].

4.2.1 Plásticos

Existen dos tipos de plásticos, los de uso general que su producción es grande con un costo bajo y son utilizados en la vida diaria como recipientes juguetes, enseres domésticos entre otros.

Los plásticos de ingeniería que son producidos en menor volumen con un precio más elevado, estos materiales tienen propiedades únicas los cuales se califican como polímeros de alta tecnología para el futuro [1].

Los principales plásticos utilizados a nivel industrial y comercial son los siguientes:

4.2.1.1 Polietileno (PE)

Es obtenido al calentar etileno con oxígeno a bajas presiones, se caracterizan por ser elásticos, flexibles y termoplásticos, según su grado de fusión pueden ser duros, rígidos o poco elásticos y resistentes a agentes químicos [2].

Sus principales aplicaciones son en la manufactura de planchas, materiales aislantes, recubrimiento contra la corrosión, protección de cultivos entre otros.

4.2.1.2 Polipropileno (PP)

Se forma mediante la polimerización del propileno, se emplean principalmente en la fabricación de tubos, fibras para cuerdas, artículos textiles y películas para empaque de alimentos [1].

4.2.1.3 Poliestireno (PS)

Se obtiene de una polimerización del estireno con ayuda de peróxidos, en la industria existe tres tipos de poliestireno como son; poliestireno de alto impacto, utilizado para vasos y plásticos desechables, poliestireno cristal usado en recipientes, y el poliestireno expandido que se utiliza principalmente como material de empaques [2].

4.2.1.4 Polimetilmetacrilato (PMMA)

Se considera como un material amorfo y su principal particularidad es su transparencia lo que le hace un buen sustituto del vidrio.

4.2.1.5 Policloruro de vinilo (PVC)

Es el polímero modificable por lo cual sus usos abarcan desde la construcción de casa hasta prendas de vestir. Se emplea fabricación de tubos, depósitos de uso médico entre otros.

4.2.1.6 Politetrafluoroetileno (Teflón)

Es un material elastico de gran resistencia térmica y química, su campo de aplicación es técnica tales como aislante eléctrico, sellantes y valvulería [1].

4.2.1.7 Poliaminas y poliésteres

Son utilizados en la fabricación de fibras, sin embargo, la mayoría de ellos son utilizados en la fabricación de piezas de plástico como:

- a) El nylon es un material industrial utilizado en bujes, engranes y partes automotrices.
- b) El polietileno Tereftalato (PET) es utilizados en fabricación de botellas y láminas de empaque.

4.2.2 Proceso de reciclaje mecánico del PET

Los diferentes usos de este material lo convierten en un polímero no amigable con el medio ambiente. La mayoría de los desechos del PET no pueden reciclarse debido a la cantidad de

impurezas que interfieren en el proceso de reciclado mecánico. Por ello, este reciclado se simplifica con el empleo de PET transparente, y la inclusión de etiquetas de fácil remoción en la etapa de lavado, evitando sistemas de impresión [3].

Reciclado se define como el reproceso de los materiales, para prepararlos con el objetivo de integrarlos a un ciclo de producción como materia prima, como se muestra en la figura 2 [3].



Figura 2. Ciclo de reciclaje [4].

Existe una gran diferencia entre el PET reciclado y el virgen, debido principalmente a la exposición térmica que experimenta el material reciclado a lo largo de su vida útil, lo que causa un decremento de su peso molecular y un incremento del ácido carboxílico, color y nivel de acetaldehído [3].

Las diferencias en las propiedades mecánicas de los dos materiales se pueden observar en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del PET [3].

Propiedades	PET Virgen	RPET
Módulo de Young [<i>MPa</i>]	1890	1630
Resistencia a la rotura [<i>MPa</i>]	47	24

Elongación a la rotura [%]	3.2	110
Resistencia al impacto [Jm^{-1}]	12	20
Temperatura de fusión [$^{\circ}C$]	244 - 254	247 – 253
Peso molecular [$gmol^{-1}$]	81600	58400

4.2.2.1 Transformación del polietileno tereftalato reciclado (RPET)

Se inicia con la reducción del tamaño y la limpieza del material recuperado, industrialmente el material es transportado por una cinta en donde pasa por un imán, el cual se encarga de retirar el material no apto para el molino como pueden ser otros tipos de plástico, metales, etc. Por lo general existen dos etapas de molido, como es la molienda gruesa en el que se reduce el tamaño hasta 15 mm ; y la molienda fina, en el que las hojuelas pueden llegar hasta 6 mm con molino de cuchillas [5].

El material molido, es lavado y centrifugado. El primer proceso se realiza con agua en lavaderos o bateas, que a la salida tiene una centrifuga. Dependiendo del estado del material (suciedad) este proceso se puede repetir cuantas veces se requiera y se puede completar con un lavado químico, para posteriormente almacenarlo en silos [5].

Las hojuelas son fundidas y dadas forma por una extrusora. Para pellet, las tiras de plástico pasan por un tanque de enfriamiento para luego ser arrastrado por un tambor rotatorio y ser transportado a una peletizadora [5].

El proceso de transformación del material reciclado se puede realizar de dos maneras, manual y automática, dependiendo de las posibilidades de cada empresa como se puede observar en la siguiente figura 3 [5].

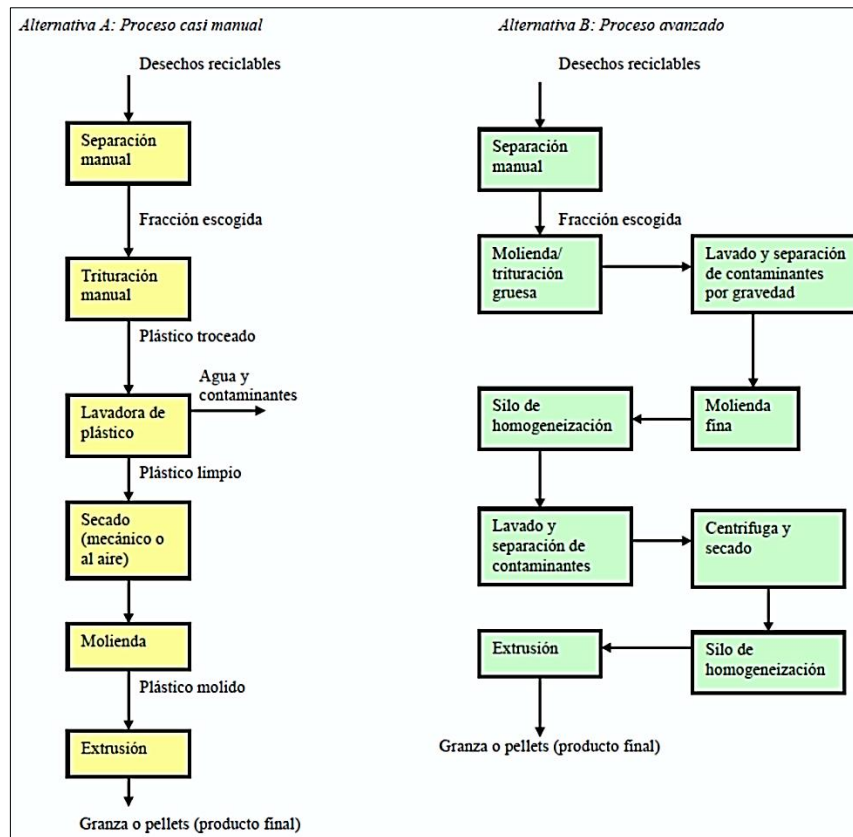


Figura 3. Ciclo de transformación del RPET [5].

4.2.3 Elastómeros

Son materiales cuya propiedad característica es su alta elasticidad y deformación mecánica, denominados estos materiales como cauchos los cuales según su origen pueden ser naturales y sintéticos [1].

El copolímero como es el neopreno es utilizado en correas de transmisión, juntas, recubrimientos e implementos de buceo [1].

4.2.4 Fibras

Sus principales propiedades de estos materiales son su resistencia extensibilidad, rigidez, elasticidad y tenacidad, su campo de aplicación es en la industria textil, pero existen fibras de altas prestaciones que se usan en aplicaciones específicas como es el kevlar conocido comercialmente [2].

4.3 Extrusión

Es un proceso industrial donde es posible obtener productos, de sección transversal uniforme en un régimen continuo. Este proceso consiste en fundir una resina a causa de la temperatura y fricción la cual es forzada a pasar por un dado el cual proporciona una forma predefinida para luego ser enfriada con el objetivo de evitar deformaciones permanentes [3].

La combinación de diferentes resinas proporciona varias propiedades al producto como son físicas biológicas o químicas. En algunos plásticos que son de difícil moldeo se utiliza aditivos comúnmente llamados plastificantes [6].

Los aditivos se los puede utilizar para mejorar las características de procesamiento del producto o para modificar las propiedades. Tales aditivos incluyen lubricantes, estabilizadores térmicos, antioxidantes y colorantes [7].

Industrialmente existen dos métodos de moldeo: el moldeo por inyección en húmedo y en seco, el cual puede ser continuo o caliente. La extrusión en húmedo se da en casos específicos para los compuestos de nitrocelulosa, en donde humedecida con alcohol se coloca en una mezcladora conjuntamente con disolventes y plastificantes el resultado de esto es un material plástico que se muele para poder ser extruido. A diferencia del moldeo en caliente que utiliza polvos de moldeo termoplásticos y máquinas relativamente pequeñas, a comparación de los usados para otros materiales como el caucho [3].

4.3.1 Equipos utilizados para la extrusión de plásticos

Estos equipos de extrusión, según la presión que ejercen al polímero fundido a través de la boquilla, de forma general se clasifican en extrusoras de desplazamiento positivo y de fricción viscosa.

Dentro de los equipos de extrusión se puede encontrar los siguientes:

4.3.1.1 Extrusoras de pistón

Este equipo como se observa en la figura 4, consta de un cilindro el cual posee resistencias que elevan la temperatura para fundir el material el cual ingresa por una tolva y es empujado por un pistón accionado por presión hidráulica o mecánica [3].

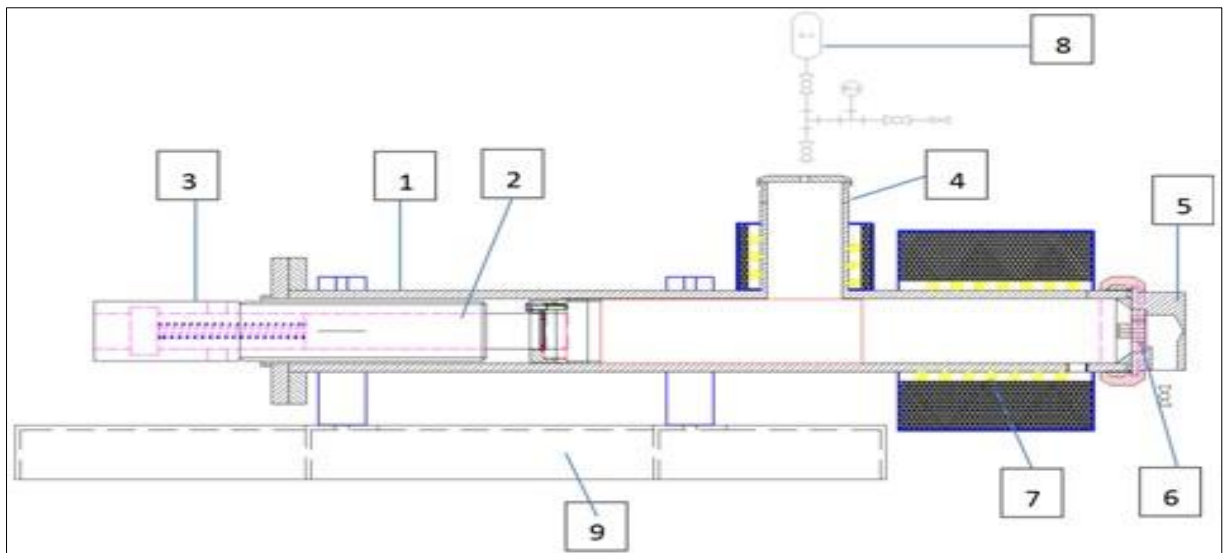


Figura 4. Extrusora de tornillo [2].

- 1) Camisa principal,
- 2) Émbolo
- 3) Mecanismo de extrusión (neumático),
- 4) Tolva,
- 5) Dado extrusor,
- 6) Tapa del cilindro principal,
- 7) Resistencias eléctricas,
- 8) Tanque de recolección de gases,
- 9) Bastidor y mesa de soporte.

4.3.1.2 Bomba de extrusión

Tienen un mecanismo con pares de engranes acoplados a la carcasa, al girar empujan el material con los dientes de los engranes. El contacto entre dientes aísla el lado de descarga de presión del lado de succión.

Este tipo de bomba es utilizado para la extracción de elastómeros y consta de dos engranes, cámara, sellos y rodamientos como se observa en la figura 5.

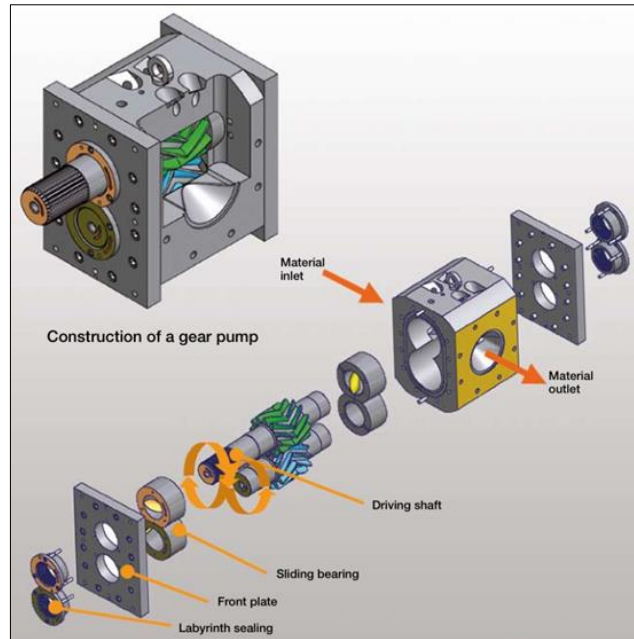


Figura 5. Bomba de extrusión [8].

4.3.1.3 Extrusora de tambor rotatorio

En este tipo de extrusora el material ingresa por gravedad mediante el émbolo hasta la cámara, que está formado por un tambor rotatorio fijado a un bastidor que varía la temperatura. En la cámara, el material es conducido por el cilindro giratorio que se encuentra en contacto con las paredes calientes del bastidor con el material fundido [3].

El material fundido es separado del cilindro giratorio con la ayuda de una cuchilla; la fundición mediante la acción de las fuerzas tangenciales se mueve hacia la boquilla.

4.3.1.4 Extrusora de rodillos

Consta de dos rodillos paralelos con giro inversos entre sí y calentados por una fuente externa, donde el material entra por la parte superior de los rodillos y al pasar la holgura que existe entre los dos rodillos se funde y moldea, como se observa en la figura 6. La cámara inferior de los rodillos, confina el polímero fundido, y no permite la salida del material si no por la boquilla.

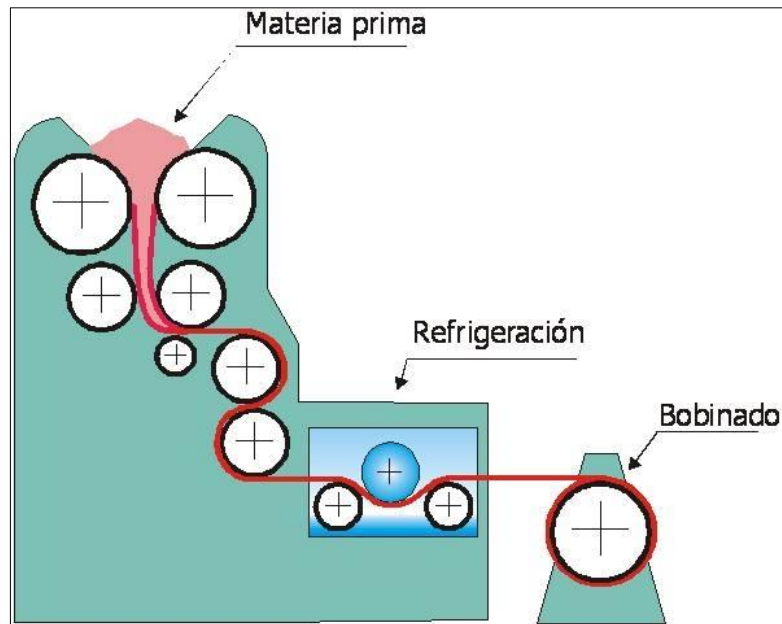


Figura 6. Extrusora de rodillos [9].

4.3.1.5 Extrusora de tornillo

Consta de un motorreductor acoplado a un tornillo que gira dentro de un cilindro el cual se calienta mediante resistencias. El material ingresa por una tolva dentro de la cámara en donde el tornillo gira, logrando así, que el material sea expulsado por una boquilla la cual da su forma [9].

Dependiendo de la capacidad que se requiera extruir el equipo constará de uno o dos tornillos, en la figura 7 se muestra una extrusora de un solo tornillo.

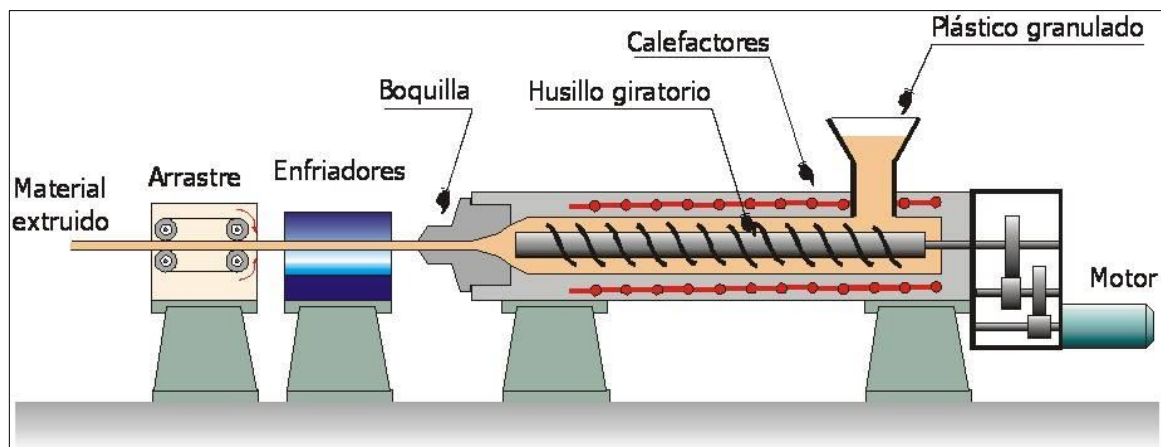


Figura 7. Partes de una extrusora de tornillo [9].

4.4 Análisis de alternativas

4.4.1 Análisis de extrusoras de tornillo

Es una máquina con la capacidad de extruir cualquier termoplástico. Se establece que, de acuerdo al diámetro y longitud del tornillo, las extrusoras más comunes son aquellas con diámetros de tornillos de 25 -200 [mm], en las tablas 2 y 3, se detalla la variación del caudal con respecto a las revoluciones del tornillo para dichas extrusoras [6].

Tabla 2. Caudales para polietileno de baja densidad con sección lisa y acanalada [10].

Diámetro del cilindro	Zona de alimentación lisa		Zona de alimentación acanalada	
	Caudal/Revolución	Caudal	Caudal/Revolución	Caudal
mm	$Kg / h.min^{-1}$	kg / h	kg / h	kg / h
60	0.6 a 0.7	140	0.9 a 1	220
90	1.7 a 1.9	300	2.6 a 2.8	450
120	3.2 a 4.2	470	5 a 5.2	650
150	7 a 8	760	8 a 8.5	840
200	15 a 17	1200	18 a 20	1500

Tabla 3. Caudales de extrusión con una sección de alimentación lisa y acanalada [10].

Diámetro del cilindro	Zona de alimentación lisa		Zona de alimentación acanalada	
	Caudal/Revolución	Caudal	Caudal/revolución	Caudal
mm	$Kg / h.min^{-1}$	kg / h	kg / h	kg / h
60	0.6 a 0.7	140	0.9 a 1	220
90	1.7 a 1.9	300	2.6 a 2.8	450
120	3.2 a 4.2	470	5 a 5.2	650
150	7 a 8	760	8 a 8.5	840
200	15 a 17	1200	18 a 20	1500

Existen dos configuraciones de extrusoras de tornillo como son; de tornillo simple y doble.

4.4.1.1 Extrusoras de tornillo simple

Es el dispositivo más utilizado en la industria de proceso de alimentos y extrusión de termoplásticos. Las principales etapas que existen para estos equipos, desde la alimentación hasta la salida por el dado del material están descritas en la figura 8, las cuales son:

- Zona de alimentación: Es donde ocurre el transporte de la materia prima y comienza a elevarse la temperatura.
- Zona de compresión: La materia prima es comprimida y sujeta a fricción y esfuerzos cortantes, logrando una fusión efectiva.
- Zona de distribución: En esta zona se homogeniza el material fundido y se mezcla.
- Zona de mezcla: esta zona no es muy frecuente ya que puede causar degradación del polímero.



Figura 8. Fases de extrusión [11].

Tabla 4. Ventajas y desventajas de extrusora de tornillo simple.

Ventajas	Desventajas
Mayor calidad de extrusión.	Velocidad limitada de dosificación.
Menor costo de producción.	Menor capacidad de mezclado.

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.1.2 Extrusora de doble tornillo

Estos mecanismos tienen mayor empuje, elevando los esfuerzos cortantes, aumentando la velocidad de flujo y mezclado intensivo. Este proceso para algunos materiales es demasiado agresivo ya que se puede degradar los pigmentos.

Existen dos tipos de extrusores de doble husillo como son: co-rotativos y contra rotativos, siendo los tornillos co-rotativos los más utilizados debido a su eficiencia.

Esta configuración de tornillos tiene una mayor dependencia de la viscosidad del material, aunque menor que en los de husillo simple. La configuración presentada en la figura 9, permite funcionar a mayores velocidades y debido a su flujo alternante entre los dos husillos se obtiene una mezcla más homogénea [12].



Figura 9. Extrusora de doble tornillo [12].

La configuración de doble husillo tiene sus complicaciones y sus beneficios los cuales están descritos en la tabla 5.

Tabla 5. Ventajas y desventajas, extrusora de doble tornillo

Ventajas	Desventajas
Notable capacidad de, mezcla	Construcción más compleja.
Alto nivel de flexibilidad de procesos	Mayor costo de fabricación.
Mayor transferencia de calor por convección	

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.1.3 Selección de alternativa para extrusora de tornillo

Para generar un intervalo de valorización que permita comparar los detalles que genera la instalación y fabricación, se define numéricamente dependiendo a su factor de importancia como se visualiza en la tabla 6.

Tabla 6. Análisis de alternativas entre extrusora de simple y doble husillo

Ítem.	Criterio	de ponderación	Factor de importancia	de Alternativa ideal	Alternativa ideal ponderada	Evaluación	
						Extrusora simple	Extrusora doble
1	Costo		0.9	10	9	8	6
2	Capacidad de extrusión		0.9	10	9	7	9
3	Tiempo de fabricación		0.8	10	8	9	7
4	Facilidad de montaje		0.8	10	8	9	8
5	Mantenimiento		0.9	10	9	8	7
6	Disponibilidad de repuestos		0.9	10	9	9	7
7	Operatividad		0.9	10	9	8	8
TOTAL				90	61	58	52

Elaborado por: David Andrés Campos Moscoso & Edwin Emilio Caraguay Pullaguari.

Con los resultados obtenidos de la evaluación (tabla 6), se llega a la conclusión que la mejor opción es la extrusora de husillo simple debido a su costo de fabricación facilidad de montaje y mantenimiento.

4.4.2 Análisis de tipo de alimentación

El sistema de alimentación de la máquina se lo realiza mediante una tolva de almacenamiento la cual puede tener configuraciones de acuerdo a las especificaciones de diseño y la capacidad requerida por la máquina.

4.4.2.1 Tolva cilíndrica

La tolva redonda cónica, como en la figura 10, se utiliza generalmente para almacenar líquidos, debido a que su configuración cilíndrica permite un paso continuo de fluido evitando que este se quede obstruido en algún cambio de sección de la tolva.

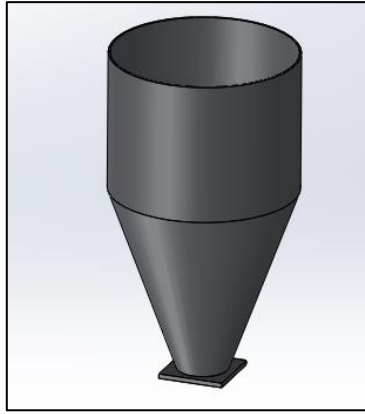


Figura 10. Tolva cilíndrica. Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Para evaluar este tipo de dispositivo de alimentación es necesario saber sus ventajas y desventajas las cuales se describen en la tabla 7.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de la tolva cilíndrica.

Ventajas	Desventajas
No posee cambios de secciones internos pronunciados.	Construcción más compleja.
No se quedan residuos de partículas de materia prima en los bordes.	Mayor precisión para unir sus partes.
Se requiere menos cantidad de material para fabricarlas.	

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.2.2 Tolva cuadrada

La tolva cuadrada, como en la figura 11, posee una parte cuadrada superior a la cual se la une con una parte inferior en forma de pirámide truncada, comúnmente se la utiliza para la descarga de materia prima sólida.

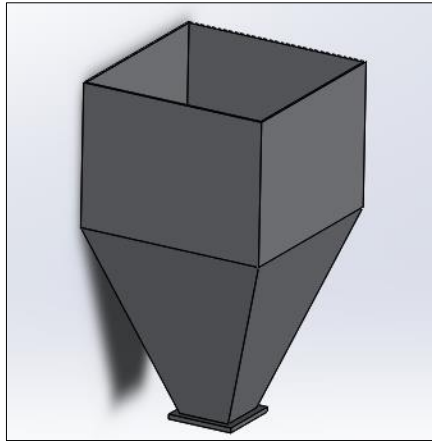


Figura 11. Tolva cuadrada. Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Para evaluar este tipo de dispositivo de alimentación es necesario saber sus ventajas y desventajas las cuales se describen en la tabla 8.

Tabla 8. Ventajas y desventajas de la tolva cuadrada.

Ventajas	Desventajas
Fabricación más simplificada.	Mayor acumulación de producto.
Fácil de reparar en el caso de existir averías.	Se requiere mayor cantidad de soldadura.
Capacidad de carga mayor.	

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.2.3 Selección de alternativas para el sistema de alimentación

Para generar un intervalo de valorización que permita comparar los detalles que genera la instalación y fabricación, se define numéricamente dependiendo a su factor de importancia como se visualiza en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación de alternativas para el sistema de almacenamiento

Ítem	Criterio ponderación	de	Factor de importancia	de	Alternativa ideal	Alternativa	Evaluación	
						ideal ponderada	Tolva cilíndrica	Tolva cuadrada
1	Costo		0.9		10	9	6	8
2	Tamaño		0.8		10	8	7	8
3	Tiempo de fabricación		0.9		10	9	8	6
4	Facilidad de montaje		0.9		10	9	8	8
5	Mantenimiento		0.9		10	9	8	7
6	Disponibilidad		0.7		10	7	7	7
7	Operatividad		0.9		10	9	9	7
TOTAL						60	53	51

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Según los resultados de la comparación entre las dos alternativas, como se muestra en la tabla 9, la opción más viable es la selección de una tolva de configuración cilíndrica, ya que esta se aproxima más al valor ideal ponderado.

4.4.3 Análisis de sistema de potencia

El sistema de potencia de la máquina, se encarga de transmitir el movimiento hacía el tornillo sin fin, de manera que se genere el funcionamiento de la extrusora de plástico.

4.4.3.1 Motor-reductor

En esta alternativa se propone usar un motor trifásico, como el de la figura 12, el cual posee una caja reductora acoplada directamente al eje de rotación del motor, esta consta de una relación de reducción mediante engranajes para disminuir la velocidad de salida del motor [13].

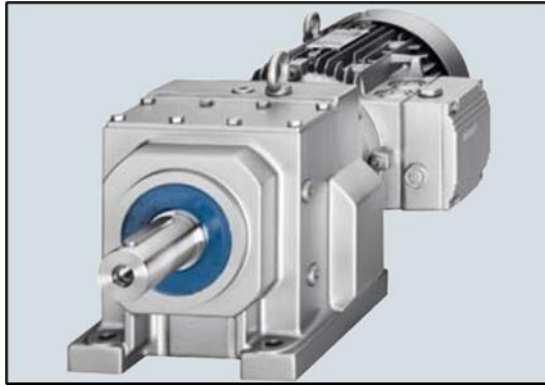


Figura 12. Motor-reductor [13].

Los sistemas de potencia tienen sus beneficios y desventajas dependiendo de la operación a la cual se diseñe, las cuales se observa en la tabla 10.

Tabla 10. Ventajas y desventajas motor-reductor.

Ventajas	Desventajas
Posee alto torque de operación.	Son muy ruidosos.
El sistema es robusto.	El costo es alto y varía de acuerdo a la potencia.
Larga vida útil de los componentes.	

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.3.2 Motor trifásico

Para la selección de un motor trifásico, mostrado en la figura 13, es necesario plantear la alternativa que permita realizar la reducción de velocidad del motor en este caso mediante el uso de poleas y piñones de cadena.



Figura 13. Motor trifásico [14].

Los sistemas de potencia tienen sus beneficios y desventajas dependiendo de la operación a la cual se diseñe, las cuales se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de motor trifásico

Ventajas	Desventajas
Los costos son bajos.	Requiere de un sistema de reducción mediante poleas y catarinas.
Variedad en el mercado.	El proceso de montaje es más complicado.
Larga vida útil.	Mantenimiento preventivo más exhaustivo.

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.3.3 Evaluación de alternativas para el sistema de potencia

Para generar un intervalo de valorización que permita comparar los detalles que genera la instalación y fabricación, se define numéricamente dependiendo a su factor de importancia como se visualiza en la tabla 12.

Tabla 12. Comparación de alternativas para el sistema de potencia.

Ítem	Criterio de ponderación	Factor de importancia	de Alternativa ideal	Alternativa ideal ponderada	Evaluación Motor-reductor	Motor trifásico
1	Costo	0.9	10	9	6	8
2	Tamaño	0.9	10	9	8	6
3	Velocidad de funcionamiento	1	10	10	8	7
4	Facilidad de montaje	0.9	10	9	9	6
5	Mantenimiento	0.8	10	8	7	5
6	Disponibilidad	0.9	10	9	7	8
7	Operatividad	1	10	10	9	8
TOTAL				64	54	48

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

En los resultados de la tabla 12, se analiza como la opción más viable para seleccionar el sistema de potencia, es mediante un motor-reductor, aunque el costo es mayor la operatividad del motor es mucho más eficiente que un sistema de reducción mediante poleas y catarinas.

4.4.4 Análisis de sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento se genera mediante resistencias eléctricas, estas son fabricadas a base de níquel, en donde el paso de energía eléctrica se transforma en energía calorífica, esta se puede cuantificar mediante la ley de Joule.

4.4.4.1 Resistencia de chapa abrazadera

El tipo de resistencias como se muestra en la figura 14 se utiliza principalmente, en la industria de inyección de plásticos para el calentamiento de los husillos, la distribución de calor es manera uniforme sobre el área que ocupa la abrazadera.

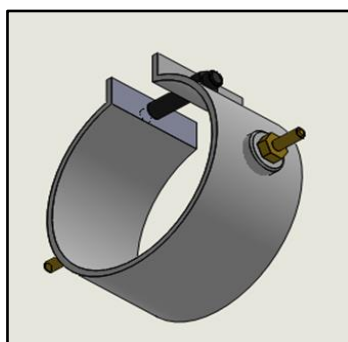


Figura 14. Resistencia de chapa abrazadera.

Los beneficios y desventajas se detallan en la tabla 13.

Tabla 13. Ventajas y desventajas resistencia de chapa abrazadera.

Ventajas	Desventajas
Su uso es muy común en la industria de la inyección de plásticos.	El área de calentamiento depende del área de contacto.
Son livianas.	El costo puede ser alto en relación a la capacidad necesaria.
El acople es mediante pernos.	

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.4.2 Resistencia de abrazadera con elementos blindados

El tipo de resistencias observada en la figura 15, permite una velocidad de calentamiento bastante rápida, además de que poseen una elevada carga específica, que permite calentar un área mayor, alcanzan temperaturas de hasta 750 °, y es posible realizar un control de temperatura de la resistencia a través de termopares instalados.

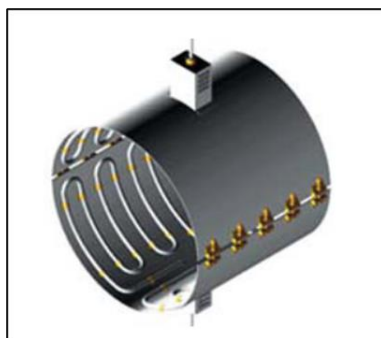


Figura 15. Abrazadera con elementos blindados

Tabla 14. Ventajas y desventajas abrazadera con elementos blindados.

Ventajas	Desventajas
Mayor capacidad de carga.	Su costo es elevado
Trabajan con altas temperaturas.	Disponibilidad del producto escasa
Control de temperatura.	

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

4.4.4.3 Selección de alternativas para el sistema de calentamiento

Para generar un intervalo de valorización que permita comparar los detalles que genera la instalación y fabricación, se define numéricamente dependiendo a su factor de importancia como se visualiza en la tabla 15.

Tabla 15. Comparación de alternativas para el sistema de calentamiento.

Ítem	Criterio ponderación	de	Factor de importancia	de	Alternativa ideal	Alternativa ideal	Evaluación	
						ponderada	Tipo chapa	Elementos blindados
1	Costo		0.9		10	9	8	6
2	Tamaño		0.9		10	9	7	8
3	Capacidad		1		10	10	7	9
4	Facilidad de montaje	de	0.9		10	9	8	7
5	Mantenimiento		0.8		10	8	8	8
6	Disponibilidad		0.9		10	9	8	6
7	Operatividad		1		10	10	8	9
TOTAL						64	54	50

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

En los resultados de la tabla 15, se puede concluir que se debe usar una resistencia de tipo abrazadera, ya que es una de las más utilizadas en el campo de la inyección de plásticos, además de que su relación costo beneficio es buena, debido a que cumple con la función específica de calentamiento del husillo y su costo no es muy alto.

4.5 Partes principales de una extrusora

4.5.1 Tornillo de extrusión

El tornillo o husillo de extrusión, según mencionan los autores Acuña y Salamanca, está compuesto de un cilindro largo rodeado por una hélice helicoidal como se muestra en la figura 16, el tornillo es una de las partes más importantes puesto que es el encargado de transportar, calentar, fundir y mezclar el material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto a realizar dependen en gran parte al diseño del tornillo. Los parámetros más importantes al diseñar el mismo son su longitud, diámetro, ángulo de filete y el paso de rosca [15].

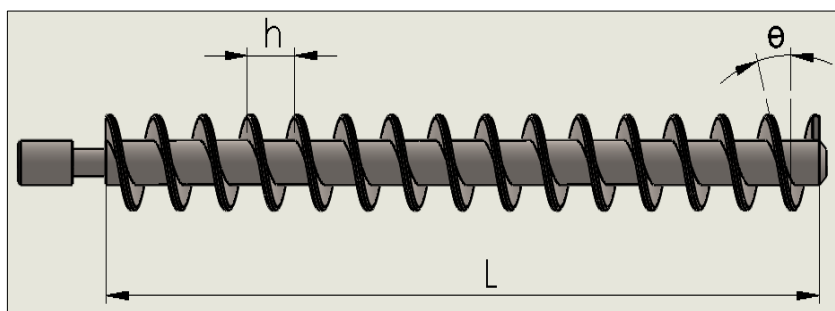


Figura 16. Tornillo extrusor. Elaborado por Campos David & Caraguay Emilio.

El tornillo desempeña uno de los roles más importantes en el funcionamiento de la extrusora de plástico, debido a que el paso y las dimensiones del mismo permiten obtener un flujo de materia prima constante, de manera que el filamento obtenido mantenga el margen del diámetro determinado por la boquilla, los tornillos de extrusión pueden variar de acuerdo al polímero que se desea trabajar debido a que existen materiales con diferentes propiedades ya sean estas, elasticidad del material, calor específico, coeficiente de fricción y temperatura de fusión, por lo que se recomienda analizar los parámetros del material que se va a utilizar para el proceso de extrusión [15].

En cada fase de extrusión definida en la figura 17 ocurre un proceso que contribuye a la homogénea y rápida fusión del polímero. El comportamiento global de la máquina depende principalmente de las variables expuestas en el siguiente gráfico.

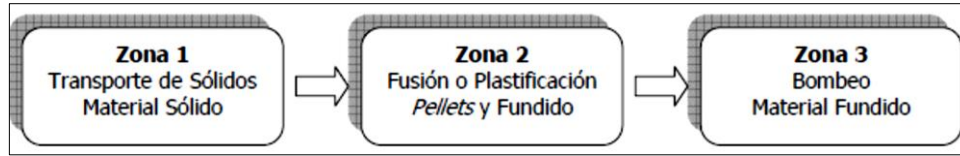


Figura 17. Diagrama de funciones en las diferentes zonas de extrusión [15].

La variable que define el volumen de producción y eficiencia es el flujo volumétrico (\dot{V}), el cual está relacionado directamente con la velocidad y el área. Esta variable se debe considerar en tres etapas: El flujo de transportación de los pellets (\dot{V}_1), el flujo de fusión del polímero (\dot{V}_2), y el flujo de dosificación (\dot{V}_3) [15].

Cuando ($\dot{V}_1 < \dot{V}_2$) se dice que la máquina está trabajando sin alimentación, causando un producto no homogéneo y de baja calidad de dosificación. Es por esto que el tornillo debe diseñarse siguiendo la siguiente condición para garantizar una buena alimentación de una zona a otra.

$$\dot{V}_1 \geq \dot{V}_2 \geq \dot{V}_3$$

Para un buen transporte del polímero el coeficiente de fricción del cilindro debe ser mayor que el del tornillo, en caso contrario no existiría flujo del material, es por esto que el tornillo extrusor debe tener un acabado tipo espejo [15].

4.5.2 Cilindro o camisa

El cilindro o camisa que se observa en la figura 18, es el encargado de envolver al tornillo extrusor, conteniendo el material. Dependiendo del tipo de husillo, los cilindros tienen diferentes características, adaptándose a la configuración del sinfín. Cuando la extrusora es de doble husillo, el cilindro posee ranuras para favorecer el transporte del material [16].

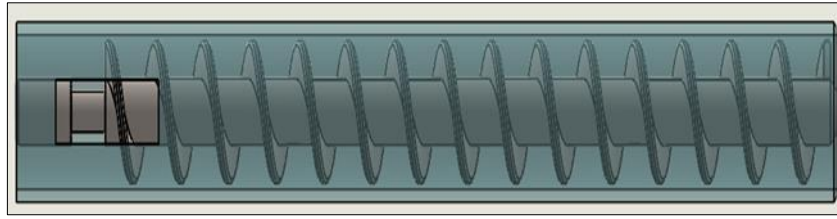


Figura 18. Cilindro o camisa. Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Para el diseño del cilindro es muy importante considerar, el material con el cual se va a trabajar debido a que este se encuentra en contacto directo con las resistencias eléctricas, que permiten la calefacción de todo el sistema, este suele construirse de aceros austeníticos muy resistentes al trabajo en caliente con el objetivo de evitar la corrosión y desgaste del material [16].

4.5.3 Tolva de alimentación

Este dispositivo es el encargado de suministrar de materia prima a la máquina para su procesamiento. Hay que tomar en consideración que algunos materiales no se deslizan de manera adecuada, por lo que es usual agregar un sistema de agitación adicional, en la figura 19 se observa una tolva cilíndrica, la más utilizada en procesos industriales [17].

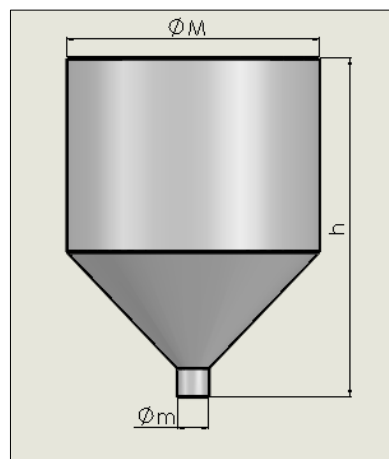


Figura 19. Tolva de alimentación. Elaborado por: Campos Davis & Caraguay Emilio.

El diseño de la tolva debe tener una geometría adecuada para que el flujo de materia prima sea de forma constante, además de un correcto ensamblaje con el cilindro para que soporte el peso cuando esta se encuentra llena de materia prima, las tolvas de sección circular permiten obtener mejores resultados al momento de producir alimentación constante hacia el tornillo extrusor [17].

4.5.4 Sistema de atemperado

El sistema de atemperado es el encargado de generar calor al husillo de tal manera que el material base pueda llegar a su temperatura de fusión sin ningún problema. Según menciona Morales en su tesis de grado, este tipo de sistemas que se observa en la figura 20, pueden ser generados en una o en varias etapas, para un control eficiente de la temperatura [17].

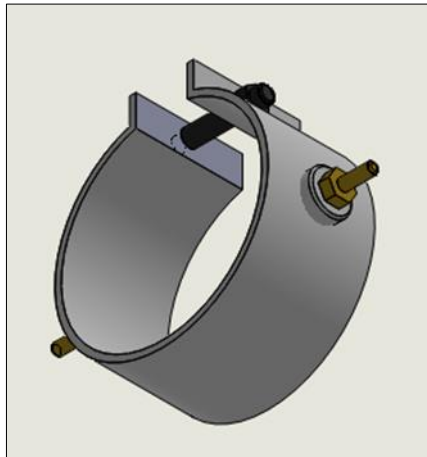


Figura 20. Resistencia de calefacción.

Por lo general el sistema de atemperado está compuesta de varias resistencias de calefacción distribuidas de manera uniforme a lo largo del cilindro para mantener una temperatura de fusión del material en toda la superficie del cilindro, de manera que no existan partes en donde se pueda pegar la materia prima por no tener una temperatura adecuada, esto dependerá de la longitud, diámetro del cilindro y la potencia de las resistencias.

4.5.5 Cabezal y boquilla

El cabezal se encuentra situada al final del cilindro, la cual sujeta a la boquilla y por lo general manteniendo el plato rompedor. Usualmente esta atornillado al cilindro. El perfil interno del cabezal debe facilitar el flujo del material hacía la boquilla. En la figura 21, se puede observar el sistema de cabezal y boquilla de forma angular, el material fluye del cilindro a la boquilla a través de un torpedo [15].

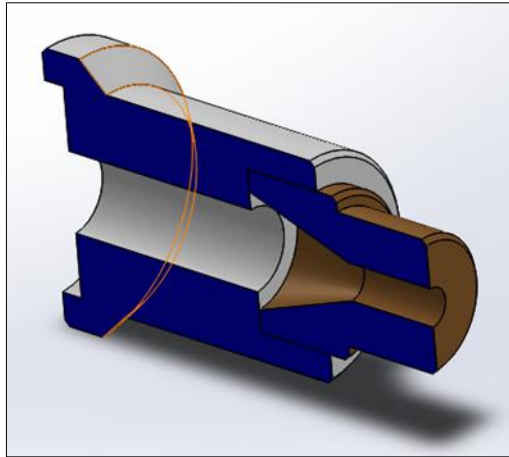


Figura 21. Cabezal y boquilla. Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

En el diseño de las boquillas, se debe considerar que existe una variación de diámetro del material extruido, con respecto al diámetro de la boquilla, ya que intervienen factores como el flujo de material fundido que sale por la boquilla, el sistema de enfriamiento y el fenómeno de relajación, estos contribuyen a que el material cambie de tamaños e incluso de su forma original [15].

4.5.6 Plato rompedor

Este dispositivo está posicionado al final del cilindro, como se muestra en la figura 22 se trata de un plato con agujeros, los autores Acuña y Fonseca, mencionan que el principal funcionamiento es captar las impurezas para que no se mezclen con el producto extruido. Los filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido [15].

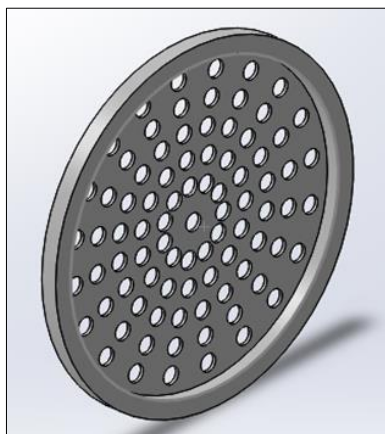


Figura 22. Plato rompedor y filtros. Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Es importante considerar la vida útil de los filtros, ya que una vez que estos comienzan a taparse por la suciedad se debe remplazar de forma inmediata debido a que esto genera una disminución en la presión del flujo de materia prima, por ello se recomienda que el sistema de acople del plato rompedor y los filtros sea de fácil acceso para los cambios pertinentes [18].

La disposición de los agujeros de un plato rompedor depende del diámetro interior de cilindro y se puede observar en la figura 23.

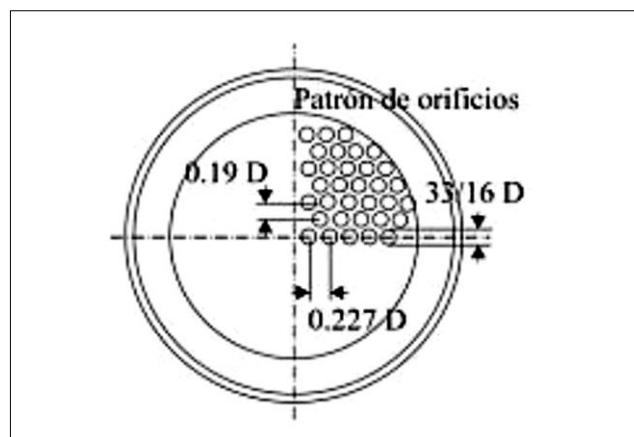


Figura 23. Disposición de agujeros en el plato rompedor [18].

4.5.7 Motor-reductor

Para determinar la potencia necesaria del motor-reductor, se toma en cuenta los parámetros de torque y velocidad que necesita la máquina para alcanzar la presión de trabajo adecuada, según menciona Enríquez [18], la velocidad de giro más recomendable en extrusoras es 15 RPM.

4.5.8 Sistema de enfriamiento

El sistema por el cual es solidificado el polímero extruido, es mediante una fuente de agua a 30 °C, en donde el polímero se enfría por inmersión o por chorro.

Para mantener el agua a la temperatura deseada es necesario un sistema de enfriamiento para el agua, según la figura 24, está formado por un recipiente, un depósito, la bomba, la torre de enfriamiento y la cañería, obteniendo de esta manera un circuito cerrado de recirculación de agua [19].

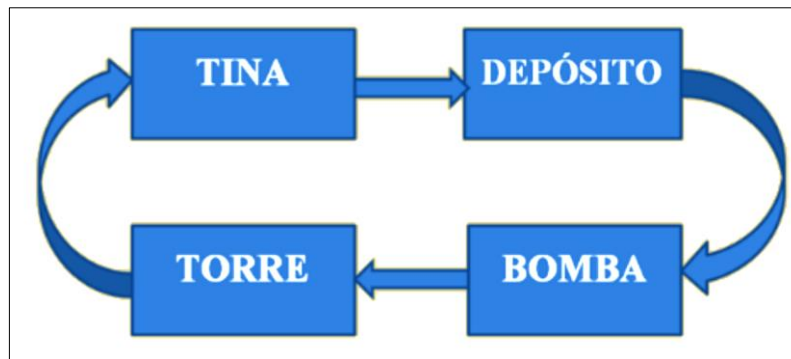


Figura 24. Circuito de recirculación del agua [19].

4.5.9 Sistema de arrastre

Existen diferentes tipos de sistema para transportar el producto, una vez extruido y solidificado por el sistema de enfriamiento los cuales se presentan en la figura 25.

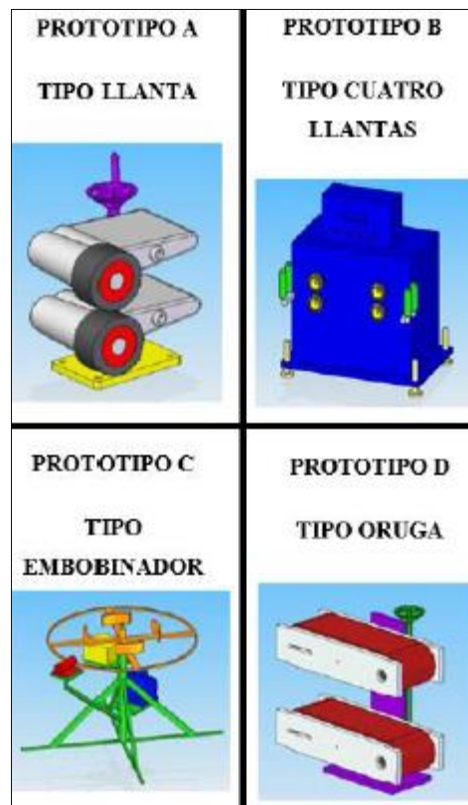


Figura 25. Sistemas de arrastre [19].

Cada sistema es óptimo según la forma con la cual es extruido el material ya que cada configuración está destinada para diferentes industrias, debido a esto para el diseño la configuración de tambor es la masa apropiada, para obtener rollos como producto final y de esta manera poder destinarlos a diferentes procesos de conformado.

4.6 Materiales y accesorios

Los materiales seleccionados de manera adecuada, según la aplicación de cada uno de los componentes correspondientes a la máquina extrusora, permiten aumentar la vida útil de esta, evitando fallas que se puedan presentar por partes defectuosas debido a una fatiga mecánica, además de considerar los parámetros de trabajo, en este caso las altas temperaturas a las que algunos componentes van a estar sometidos. El uso adecuado de catálogos de los aceros, permite identificar las propiedades que estos poseen en función de su composición química, de esta manera se selecciona los más adecuados para un funcionamiento óptimo del equipo [20].

La máquina también consta de accesorios que permiten controlar los factores que garantizan un correcto funcionamiento como es el caso de sensores de temperatura, controladores de temperatura y variadores de frecuencia para controlar la velocidad de giro del husillo.

4.6.1 Aceros aleados

Un acero aleado se considera cuando los grados de aleación superan los siguiente límites: 1.65 manganeso, 0.60 silicio, 0.60 cobre. Se considera un acero aleado cuando contiene un mínimo porcentaje de elementos requeridos dentro de los límites de los aceros aleados constructivos: aluminio, cromo, cobalto, columbio, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio, zirconio, o cualquier otro elemento para obtener un efecto de aleación especificado [20].

Según la nomenclatura para aceros AISI- SAE los grados estándar de aceros aleados no deberían exceder del 4.0 sobre y por encima del porcentaje permitido en acero al carbón [20].

4.6.1.1 Aceros para moldes plásticos (AISI P20)

Es una aleación de cromo – níquel – molibdeno, desgasificado en vacío, que se puede someter a tratamientos térmico para obtener las siguientes propiedades: sin riesgos de temple, sin costos por temple, no hay que rectificar deformaciones, puede nitrurarse para aumentar la resistencia superficial al desgaste o temple para reducir daños en la superficie, buena maquinabilidad, gran pureza y buena homogeneidad [21].

En la tabla 16 se detalla las propiedades del acero AISI P20.

Tabla 16. Propiedades mecánicas acero AISI P20 [21].

Descripción	Valor
Resistencia a la cedencia	32 MPa
Resistencia a la tracción	65 MPa
Elongación, A5	Min 10%
Reducción de área	40%
Dureza	220-225 HB

4.6.1.2 Aceros bonificados para maquinaria (AISI 4140)

Es una aleación de molibdeno cromo y níquel, dándole una solubilidad limitada y excelente formador de carburos. Es un material con buen efecto al temple aumentando la dureza y resistencia a las altas temperaturas, las propiedades mecánicas de dicho material se detallan en la tabla 17 [21].

Tabla 17. Propiedades mecánicas acero AISI 4140 [21].

Descripción	Valor
Resistencia a la cedencia	70 MPa
Resistencia a la tracción	110 MPa
Elongación, A5	Min 12%
Reducción de área	45%
Dureza	270-330 HB

4.6.1.3 Acero al carbono para maquinaria

Es un acero al carbono con buena tenacidad, se caracteriza principalmente por su alta uniformidad y rendimiento. Puede ser acondicionado mediante tratamiento térmico de temple y revenido. Su campo de aplicación es para partes de maquinaria simple. La dureza de suministro aproximada es de 220 HB, y otras propiedades se describen en la tabla 18 [21].

Tabla 18. Propiedades mecánicas acero AISI 1045 [21].

Descripción	Valor
Resistencia a la cedencia	32 MPa
Resistencia a la tracción	65 MPa
Elongación, A5	Min 10%
Reducción de área	40%
Dureza	270-235 HB

4.6.2 Aceros al carbono

Tiene pocos elementos de aleación. Estos aceros según menciona Belzunce en su documento de investigación, se los utiliza en estado bruto, es decir, como salen de forja o laminación, normalmente el carbono de estos aceros varía desde 0.05 hasta 1.0 % y manganeso del 0.25 al 1.7 % [22].

4.6.2.1 Acero ASTM A36

Es un acero al carbono, estructural para la fabricación de puentes y en el sector de la construcción en general que cumplen los requisitos de normas ASTM A36/A36M, principalmente se aplican en chapas laminadas, productos largos incluyendo los aceros conformados, sus propiedades mecánicas se detallan en la tabla 19 [23].

Tabla 19. Propiedades mecánicas acero ASTM A36 [23].

Descripción	Valor
Resistencia a la fluencia	250 MPa
Resistencia a la tensión	550 MPa
Elongación, A5	Min 23%
Módulo de elasticidad	200 GPa
Densidad	7.85 g / cm ³

4.7 Soldadura

Es un proceso donde dos partes son unidas mediante la fundición del material de aporte o en otros casos de las mismas partes a unir. La soldadura permite unir piezas de materiales iguales y en algunos casos diferentes, de forma permanente por medio de la fusión del material de aporte o por fusión de los materiales [24].

4.7.1 Soldadura por electrodo revestido

Es un proceso de unión entre dos metales por medio de una fundición localizada producida por un arco eléctrico. El electrodo consta, figura 26, de un núcleo metálico al cual se le agrega un revestimiento que al quemarse se gasifica, actuando como una barrera protectora, a la vez que mejorar el aspecto del proceso [24].

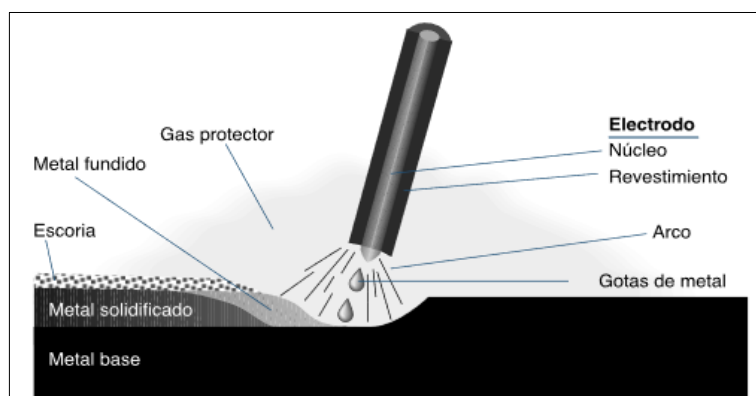


Figura 26. Proceso de soldadura por electrodo revestido [24].

4.7.2 Soldadura por electrodo metálico protegido por gas inerte (GMAW)

Este proceso es similar al proceso por electrodo revestido, la variante consta de que el electrodo es un material consumible que al mismo tiempo genera un arco electrodo y una atmosfera protectora generado por un gas inerte [24].

En la figura 27 se observa las partes que componen a este tipo de soldadura.

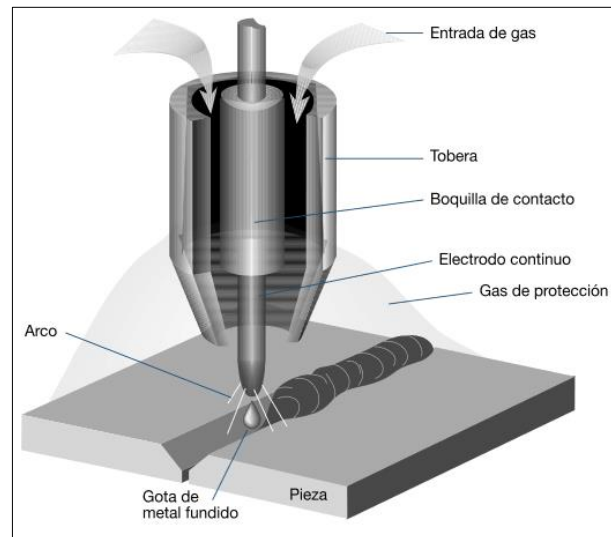


Figura 27. Proceso de soldadura por electrodo protegido por gas inerte [24].

4.7.3 Electrodo E-6011

Este tipo de electrodo consta de un revestimiento celulósico diseñado para ser usado con electrodo positivo. La prematura solidificación del material fundido simplifica la soldadura en cualquier posición permitiendo altas velocidades de soldadura [24].

- Aplicaciones típicas

El cordón de raíz es utilizado en cañerías en oleoductos, reparaciones generales, estructuras y planchas galvanizadas.

Sus propiedades mecánicas para dichas aplicaciones se los puede observar en la tabla 20.

Tabla 20. Propiedades mecánicas electrodo E-6011 [24].

Descripción	Valor
Resistencia a la fluencia	424 MPa
Resistencia a la tracción	495 MPa
Alargamiento en 50 mm	Min 27%
Amperaje máximo	90-220 A
Amperaje mínimo	50-160 A

4.7.4 Electrodo E-7018 / E-4918

Es un electrodo de bajo contenido de hidrogeno con una resistencia a la humedad, es usado en procesos donde requiera altos controles radiológicos en toda posición [24].

- Aplicaciones típicas

Se aplica principalmente en calderas, cañerías, estructuras sometidas a altas cargas, tanques de almacenamiento, sus propiedades mecánicas se observan en la tabla 21.

Tabla 21. Propiedades mecánicas electrodo E-7018 [24].

Descripción	Valor
Resistencia a la fluencia	445 MPa
Resistencia a la tracción	535 MPa
Alargamiento en 50 mm	Min 30%
Amperaje máximo	120-275 A
Amperaje mínimo	70-200 A

4.8 Juntas atornilladas

El tipo de tornillo es definido por la calidad del acero empleado en la fabricación. En la siguiente tabla 22 se muestra los valores nominales del límite elástico f_{yb} y a la resistencia última a la tracción, los cuales se debe tomar como valores característicos en los cálculos [25]:

Tabla 22. Valores nominales de límite elástico y resistencia última a la tracción [25].

Límite elástico y resistencia a tracción última de tornillos							
Tipo de tornillo	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{yb} [N / mm^2]$	240	320	300	400	480	640	900
$f_{ub} [N / mm^2]$	40	400	500	500	600	800	1000

Las uniones atornilladas se emplean principalmente en donde se requiera una unión desmontable y que sea resistente a cargas externas de tensión, momento y cargas cortantes o una combinación de ellas, la cual consta de elementos como: pernos, tuercas y arandelas para fijar dos elementos [26].

CAPÍTULO II

DISEÑO DE COMPONENTES

5.1 Generalidades

En la presente sección se trata las fórmulas que rigen el diseño de un tornillo de extrusión, así como también los componentes que conforman una extrusora de tornillo simple para inyección de polímeros, analizando el comportamiento mecánico, térmico y de control para la transformación del polímero mediante adición de calor, mediante los resultados obtenidos con la aplicación de fórmulas se estima el dimensionamiento que tendrá cada elemento,

escoger los materiales y componentes disponibles en el mercado actual para el correcto funcionamiento y una óptima operatividad y mantenimiento para el usuario.

Para el inicio de los cálculos se toma en consideración el flujo másico de producción el cual es de 5 kg/h y un diámetro nominal del tornillo de 30 [mm].

5.2 Diseño del tornillo sin fin

Todos los tornillos están compuestos de una serie de partes que se especifican en la figura 28, las cuales son utilizadas para su modelado.

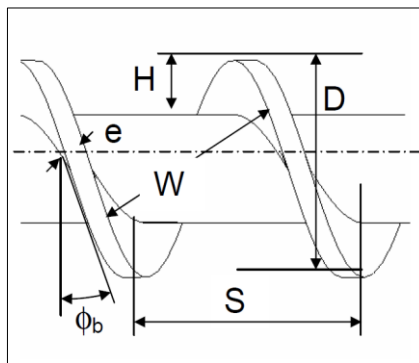


Figura 28. Partes de tornillo extrusor.

Dónde:

e = espesor de filete que normalmente es $0.1D$

D = Diámetro nominal del tornillo

S = Paso diametral.

H = Altura del filete

ϕ_b = Ángulo de paso

W = Ancho del canal

5.2.1 Diámetro del tornillo extrusor

Para el cálculo del diámetro D del tornillo extrusor es necesario el flujo volumétrico \dot{V} de dosificación el cual sería un dato de entrada.

$$D = \left(\frac{\dot{V}}{7.291 \times 10^{-3}} \right)^{1/1.774} \quad (1)$$

5.2.2 Relación L/D

Generalmente para la transformación de plástico se utiliza una relación de 20 a 25: 1, dependiendo de la relación que se escoja la longitud varia como por ejemplo con una relación de 24:1 la longitud seria la siguiente.

$$L = 24 \cdot D \quad (2)$$

5.2.3 Ángulo de hélice (ϕ_B)

Es el ángulo de la hélice en la superficie del cilindro, se puede calcular considerando una espira del tornillo con se observa en la figura 29.

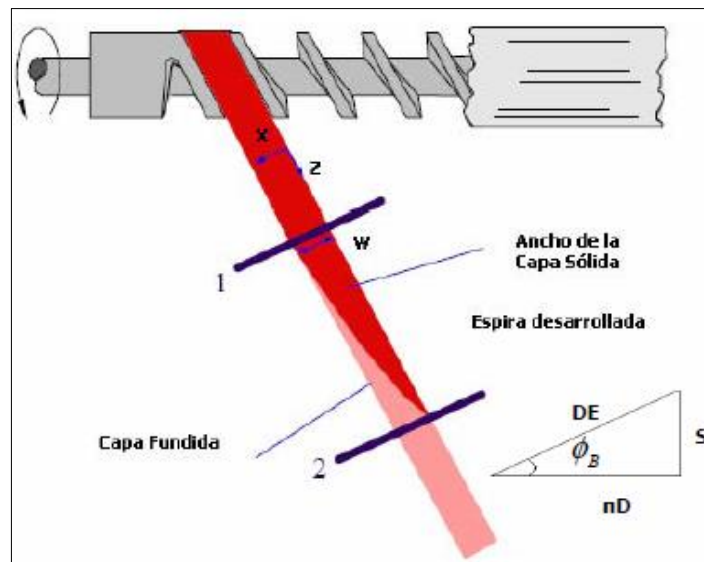


Figura 29. Desarrollo de una espira de un tornillo [15].

Donde DE es el desarrollo de la espiral y πD el perímetro, por lo cual el ángulo de hélice está definido por la siguiente fórmula.

$$\phi_B = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi \cdot D}\right) \quad (3)$$

5.2.4 Paso del husillo (t)

Es la distancia que existe entre crestas, de las hélices del tornillo y está definida como:

$$t = \pi \cdot D \cdot \tan \phi_B \quad (4)$$

5.2.5 Ancho del canal (W)

Es la cota, medida entre un determinado punto del filete al siguiente y está definido por la ecuación:

$$W = (S \cdot \cos \phi_B) - e \quad (5)$$

5.2.6 Altura de filete

La altura de filete máxima, H_{\max} , en la alimentación no debería superar a:

$$H_{\max} = 0.2 \cdot D \quad (6)$$

Se aconseja que la altura de filete tenga la siguiente relación:

$$2H_D < H_A < 4H_D$$

Donde H_A es la altura de filete en la alimentación y H_D en zona de dosificación.

5.2.7 Longitud de las zonas del husillo ($l_{1,2,3}$)

La disposición de longitud para las tres zonas como son: la de alimentación, compresión y dosificación esta determinadas por las siguientes ecuaciones [15]:

Zona de alimentación

$$l_1 = \frac{L}{2} \quad (7)$$

Zona de Compresión

$$l_2 = \frac{L}{4} \quad (8)$$

Zona de dosificación

$$l_3 = \frac{L}{4} \quad (9)$$

5.3 Cálculo del tornillo sin fin

Para el diseño del tornillo según “Savagorodny” [27] menciona que para la extrusión de polietilenos se puede trabajar con una relación de proporcionalidad de 15:1 hasta 21:1, esto de acuerdo a la aplicación de la máquina.

En la tabla 23 se detalla los datos requeridos para el diseño del sistema.

Tabla 23. Datos de diseño del tornillo sin fin

Datos	Magnitud
Flujo másico (\dot{m})	5 [kg / h]
Diámetro nominal (D_n)	30 [mm]
Relación de proporcionalidad (L/D_n)	15:1
Factor de proporcionalidad (k)	66.7
Densidad del PET (δ)	1.36 [g / cm ³]
Calor específico (C_p)	1350 [J/Kg° K]
Esfuerzo a la fluencia del AISI 4140 (S_y)	690 [MPa]

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Debido al proceso de producción de la máquina, se recomienda para perfiles y laminados utilizar la relación de proporcionalidad de 15:1 mostrada en la siguiente ecuación.

$$L = 15 \cdot 30 \text{ [mm]}$$

$$L = 450 \text{ [mm]} \Rightarrow 0.45 \text{ [m]}$$

Para la obtención del paso de husillo (s), Savgorodny recomienda que se debe utilizar la relación 0.8:1 para el caso de extrusión de polietileno.

$$s = 0.8 \cdot D_n$$

$$s = 0.8 \cdot 30 \text{ [mm]}$$

$$s = 24 \text{ [mm]}$$

El ángulo de la hélice está dado por la ecuación 3

$$\phi_B = \tan^{-1}\left(\frac{24}{\pi \cdot 30}\right)$$

$$\phi_B = 14.28^\circ$$

Usando una relación $0.1 D_n$ para la obtención del espesor de filete se obtiene lo siguiente:

$$e = 0.1 \cdot 30 \text{ [mm]}$$

$$e = 3 \text{ [mm]}$$

El ancho del canal está definido por la ecuación 5.

$$W = (24 \cdot \cos(14.28^\circ)) - 3 \text{ [mm]}$$

$$W = 20.26 \text{ [mm]}$$

Tomando en cuenta el tamaño de pellet de 6 mm como media máxima con la que ingresa a la tolva se toma el valor máximo especificado en la ecuación 6.

$$H_A = 0.2 \cdot 30 \text{ [mm]}$$

$$H_A = 6 \text{ [mm]}$$

Para obtener la altura de filete en la dosificación primero es necesario obtener el diámetro interno del husillo en la zona de alimentación de la siguiente manera:

$$D_{i_1} = D_n - 2 \cdot H_A$$

$$D_{i_1} = 30 - 2 \cdot 6 \text{ [mm]}$$

$$D_{i_1} = 18 \text{ [mm]}$$

Altura de filete en la zona de dosificación está dada por la siguiente ecuación:

$$H_D = |H_A - s \cdot \tan(D_i)| \quad (10)$$

Dónde:

D_i es el diámetro menor en la zona de alimentación

$$H_D = 6 - (24 \cdot \tan(18)) \text{ [mm]}$$

$$H_D = 1.8 \text{ [mm]}$$

Con los datos obtenidos se calcula las longitudes de las zonas de alimentación, compresión y dosificación según ecuaciones 7.8.9 respectivamente.

$$l_1 = \frac{450}{2} = 225 \text{ [mm]} \rightarrow \text{zona de alimentación}$$

$$l_2 = \frac{480}{4} = 112.5 \text{ [mm]} \rightarrow \text{zona de compresión}$$

$$l_3 = \frac{480}{4} = 112.5 \text{ [mm]} \rightarrow \text{zona de dosificación}$$

La holgura entre la camisa y el tornillo es determinada por la ecuación 10.

$$\Delta = 0.002 \cdot 30 \text{ [mm]}$$

$$\Delta = 0.06 \text{ [mm]}$$

5.3.1 Análisis de esfuerzos del tornillo

Este análisis es vital para validar el dimensionamiento del tornillo y verificar su comportamiento en su funcionamiento, así como sus esfuerzos máximos admisibles.

En la figura 30 se puede observar las cargas que soporta un husillo de extrusión de plástico

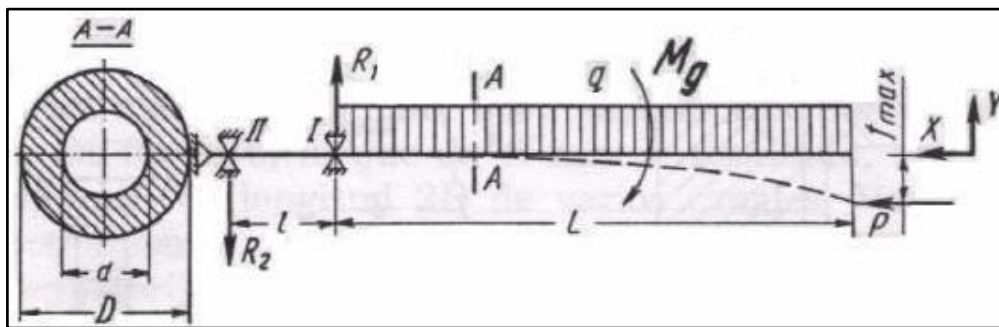


Figura 30. Diagrama de fuerzas del husillo [27].

Par obtener el momento flector en el tornillo es necesario calcular el número de revoluciones por minuto con el cual girará el tornillo, esto se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\frac{m}{\text{cm}^3}}{2.3 \cdot D_n^2 \cdot H_A \cdot g} \quad (11)$$

Dónde:

N es las revoluciones por minuto [rpm]

g es la gravedad específica del PET 1.36 [g / cm³]

El 2.3 = factor de conversión

Reemplazando los datos se obtiene las revoluciones del husillo.

$$N = \frac{11 \text{ [lb/h]}}{2.3 \cdot (1.18 \text{ [pulg]})^2 \cdot 0.236 \text{ [pulg]} \cdot 1.36 \text{ [g/cm}^3\text{]}}$$

$$N = 10.70 \text{ [rpm]}$$

Mientras que la potencia de motor se calcula con la siguiente ecuación:

$$Pot = \frac{N \cdot \pi \cdot D_n^3}{f_p^2} \quad (12)$$

Dónde:

N : Número de revoluciones (RPM)

f_p : Factor de proporcionalidad

$$Pot = \frac{10.70 \cdot \pi \cdot 30^3}{66.7^2}$$

$$Pot = 204 \text{ [W]} \Rightarrow 0.273 \text{ [hp]}$$

Con las RPM obtenidas del husillo se calcula el torque T del husillo con la siguiente fórmula:

$$T = 9550 \cdot \frac{Pot}{N} \quad (13)$$

$$T = 9550 \cdot \frac{0.372 \text{ [kW]}}{10.70 \text{ [rpm]}}$$

$$T = 332 \text{ [Nm]}$$

Se calcula el área superficial A_s y la presión máxima P_{\max} para determinar la fuerza axial F_a , en el tornillo.

La presión máxima P está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{6 \cdot \pi \cdot D_i \cdot L \cdot N \cdot \nu}{H_A^2 \cdot \tan(\phi_B)} \quad (14)$$

Donde ν es la viscosidad efectiva del PET 500 [Pa · s], por lo tanto, la presión máxima es lo siguiente:

$$P = \frac{6 \cdot \pi \cdot 0.026 \text{ [m]} \cdot 0.48 \text{ [m]} \cdot 0.18 \left[\frac{\text{rev}}{\text{s}} \right] \cdot 500 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}}{(0.0018 \text{ [m]})^2 \cdot \tan(14.28)}$$

$$P = 25.67 \text{ [MPa]}$$

Para el área superficial se calcula de la siguiente manera:

$$A_s = \frac{\pi \cdot D_n^2}{4} \cdot (1 - u^2) \quad (15)$$

$$A_s = \frac{\pi \cdot 30^2}{4} \cdot \left(1 - \left(\frac{18}{30}\right)^2\right) \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_s = 4.52 \times 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

La fuerza axial F_a es el producto del área superficial y la presión máxima.

$$F_a = P \cdot A_s \quad (16)$$

$$F_a = 25.67 \left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \right] \cdot 4.52 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F_a = 11602.84 \text{ [N]}$$

Por consiguiente, la tensión tangencial máxima es:

$$\tau = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D_n^3 \cdot (1 - (\frac{D_i}{D_n})^4)} \quad (17)$$

$$\tau = \frac{16 \cdot 332 \text{ [Nm]}}{\pi \cdot (0.030 \text{ [m]})^3 \cdot (1 - (\frac{18}{30})^4)}$$

$$\tau = 71.94 \text{ [MPa]}$$

Se determina la carga distribuida del eje mediante la siguiente fórmula.

$$q = \frac{w_{\text{husillo}}}{L} \quad (18)$$

El peso de husillo w_{husillo} se determina de la siguiente forma

$$w_{\text{husillo}} = \delta \cdot \forall \cdot g \quad (19)$$

Donde δ es la densidad del acero AISI 4140, \forall el volumen del husillo y g la gravedad

$$w_{\text{husillo}} = 7850 \text{ [kg/m}^3] \cdot 2.71 \times 10^{-4} \text{ [m}^3] \cdot 9.8 \text{ [m/s}^2]$$

$$w_{\text{husillo}} = 20.88 \text{ [N]}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 18 se obtiene lo siguiente:

$$q = \frac{20.88 \text{ [N]}}{0.6 \text{ [m]}}$$

$$q = 34.8 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

La tensión normal es provocada por la fuerza axial y la carga distribuida del peso del tornillo, y está definido por la siguiente fórmula.

$$\sigma = \frac{F_a}{A_s} + \frac{M_f}{W_0} \quad (20)$$

Dónde:

M_f Momento de flexión máximo

W_0 Momento de inercia respecto al eje neutro

El momento de flexión máximo está definido por la siguiente ecuación:

$$M_f = \frac{\delta_{4140} \cdot g \cdot L^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D_2}{4} \cdot (1 - u^3) \quad (21)$$

Donde u es la relación entre el diámetro inferior y el diámetro superior $u = \frac{D_{i_1}}{D_{i_2}} = 0.71$

$$M_f = \frac{7850 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0.6 [m]^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot 0.026^2 [m^2]}{4} \cdot (1 - 0.6^3)$$

$$M_f = 5.76 \text{ [Nm]}$$

El momento de inercia con respecto al eje neutro se obtiene de la ecuación 22

$$W_0 = \frac{\pi \cdot D_n^3}{32} \cdot (1 - u^4) \quad (22)$$

$$W_0 = \frac{\pi \cdot 0.03^3}{32} \cdot (1 - 0.6^4) \text{ [m}^3\text{]}$$

$$W_0 = 2.3 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

Por lo tanto, la tensión normal σ usando la ecuación 20 es:

$$\sigma = \frac{11602.84 \text{ N}}{4.52 \times 10^{-4} \text{ m}^2} + \frac{5.76 \text{ Nm}}{2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 28.17 \text{ [MPa]}$$

Con los datos obtenidos se calcula la tensión resultante mediante la ecuación 23.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sqrt{28.17^2 + 4 \cdot 71.94^2} \text{ [MPa]} \\ \sigma' &= 146.61 \text{ [MPa]}\end{aligned}$$

Para determinar el factor de seguridad del husillo es necesario despejar n de la siguiente ecuación.

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad (24)$$

Donde S_y es la resistencia a la fluencia del acero AISI 4140 especificado en la tabla 23.

$$\begin{aligned}n &= \frac{414 \text{ [MPa]}}{146 \text{ [MPa]}} \\ n &= 2.83\end{aligned}$$

El valor obtenido del factor de seguridad es de 2.83, esto debido a que, para el dimensionamiento del tornillo, se consideró la profundidad del canal la cual tiene que ser como mínimo el tamaño de una muestra de pellet en este caso de 6 mm, para este tipo de máquina se recomienda un factor de seguridad de 2, por lo cual el diseño no tendrá problemas de falla. Para la selección del material, se considera los diámetros más comunes que existen en el mercado, según los existentes en el anexo 2, se selecciona un eje de 32 mm de diámetro y 605 mm de longitud para su mecanizado.

5.4 Dimensionamiento del cilindro

5.4.1 Tolerancia Tornillo/ cilindro

La holgura entre la cresta del filete y el cilindro, es de suma importancia para los equipos de extrusión. Cuando la holgura es mayor el mezclado es más efectivo, pero disminuye el avance del polímero debido al aumento del flujo inverso del material [15].

Para husillos de diámetro constante se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta = 0.002 \cdot D \quad (25)$$

Para el cálculo del espesor del cilindro, se consideran las presiones a las cuales la máquina estará sometida para realizar el proceso de extrusión de plástico.

$$e_c = r_i \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2P_{\max}}{\sigma_t - 2P_{\max}}}\right) \quad (26)$$

Dónde:

e_c : Espesor del cilindro (mm)

r_i : Radio interior del cilindro (mm)

P_{\max} : Presión interna del cilindro (MPa)

σ_t : Esfuerzo máximo de fluencia del material (MPa)

Para el diseño del cilindro, se debe considerar el tamaño del espesor de la pared con lo cual se obtendrá el diámetro exterior, el diámetro interior de este se determina con la ecuación 27.

$$D_{ih} = D_n + 2 \cdot \Delta \quad (27)$$

$$D_{ih} = 30[\text{mm}] + 2 \cdot 0.06[\text{mm}]$$

$$D_{ih} = 30.12[\text{mm}]$$

El espesor de pared del cilindro se obtiene aplicando la ecuación 28 descrita a continuación:

$$e_c = r_i \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2P_{\max}}{\sigma' - 2P_{\max}}}\right) \quad (28)$$

$$e_c = 0.015 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2 \cdot 3.21[\text{MPa}]}{79.2[\text{MPa}] - 2 \cdot 3.21[\text{MPa}]}}\right)$$

$$e_c = 0.01[\text{m}] \rightarrow 10[\text{mm}]$$

El diámetro requerido según el cálculo es de 50 [mm], según el catálogo de materiales mostrado en el anexo 2, se trabajará con una barra perforada EN 10294-1, la cual es aplicada

para construcción de cilindros, ya que posee una aleación de vanadio al 0.12%, que le otorga una mayor resistencia al desgaste y la corrosión, con dimensiones de 50 mm para diámetro exterior, 30 mm para diámetro interior y 500 mm de longitud.

5.5 Tolva de alimentación

El dimensionamiento de la tolva, se diseña en función de la capacidad de carga que se requiere en la máquina, para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones [28].

$$\forall = \frac{m}{\delta} \quad (29)$$

Dónde:

δ : Densidad del material a extruir (kg/m³)

m : Masa del material a extruir (Kg)

Para el cálculo de la altura de la tolva, el fabricante debe tener en cuenta el ángulo de inclinación de la tolva de alimentación, se utiliza la siguiente ecuación.

$$h_{Tolva} = \frac{\phi_M - \phi_m}{2 \tan \alpha} \quad (30)$$

Dónde:

ϕ_M : Diámetro mayor de la tolva de alimentación [mm]

ϕ_m : Radio menor de la tolva de alimentación [mm]

α : Ángulo de inclinación del cono

El espesor se calcula relacionando la presión que ejerce la materia prima almacenada en la tolva sobre las paredes de esta, considerando los esfuerzos tangenciales y longitudinales que se presentan en las paredes de la tolva.

$$\sigma_A + \sigma_B = \frac{S_y}{n} \quad (31)$$

Dónde:

σ_A : Esfuerzo tangencial (MPa)

σ_B : Esfuerzo longitudinal (MPa)

S_y : Esfuerzo de fluencia del material (MPa)

n : Factor de seguridad recomendado

La tolva de alimentación debe soportar la cantidad de material a ser extruir alrededor de una hora de trabajo, en este caso [5 kg/h], considerando la capacidad y la densidad del PET, se aplica la ecuación 29, para determinar el volumen.

$$\begin{aligned}\forall &= \frac{m}{\delta} \\ \forall &= \frac{5[\text{Kg}]}{1360[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}]} \\ \forall &= 3.67 \times 10^{-3} [\text{m}^3]\end{aligned}$$

Para el dimensionamiento de la tolva, se considera el diámetro menor de la abertura el cual debe ser proporcional al diámetro del cilindro, en la figura 31, se detallan las variables que deben calcularse.

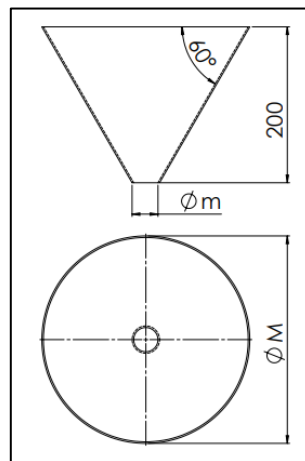


Figura 31. Variables de tolva.

Para el cálculo del diámetro menor de la tolva se considera el 70% del diámetro externo del cilindro, ecuación 32.

$$\phi_m = 0.7 \cdot D_{ec} \quad (32)$$

Dónde:

D_{ec} : Diámetro exterior del cilindro [mm]

ϕ_m : Diámetro menor de la tolva [mm]

$$\phi_m = 0.7 \cdot 50 \cdot [\text{mm}]$$

$$\phi_m = 35 \cdot [\text{mm}]$$

Para determinar el diámetro mayor de la tolva se utiliza la ecuación 33, para el valor del ángulo de inclinación del cono se plantea trabajar con 60° , considerando que con este valor se obtiene dimensiones proporcionales.

$$\phi_M = 2 \tan \alpha \cdot h_1 + \phi_m \quad (33)$$

$$\phi_M = 2 \tan(30) \cdot 200[\text{mm}] + 35[\text{mm}]$$

$$\phi_M = 266[\text{mm}]$$

Con los valores obtenidos, se plantea utilizar una chapa metálica AISI 1018, mostrado en el anexo 4 con 1.5 mm de espesor esto con el fin de tener un proceso de soldadura más óptimo ya que con espesores menores el proceso se puede complicar y no se tendría buenos resultados.

5.6 Sistema de calentamiento

Todo sistema de calentamiento superior a las 40°C se debe tomar las medidas adecuadas para asegurar la integridad del operador. Sabiendo esto el sistema tendrá un cobertor aislante alrededor del sistema de resistencias con un panel protector de plancha de galvanizado de 1 mm como se observa en la figura 32, para ocultar el material aislante, que para este caso se usará lana de vidrio.

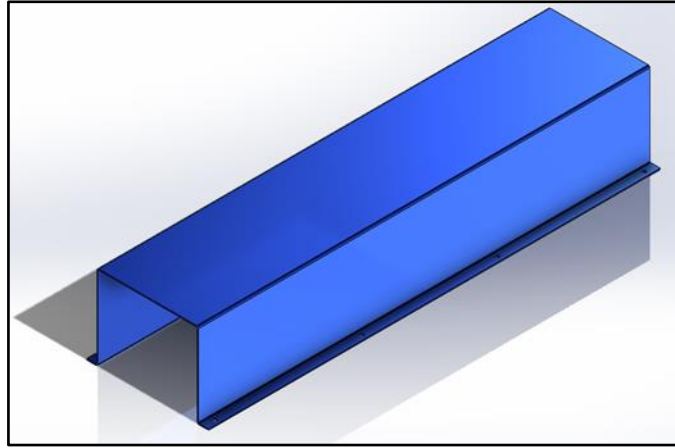


Figura 32. Cobertor del sistema de calentamiento.

Para determinar la potencia necesaria que debe tener la resistencia para calentar el husillo, se considera como aspecto principal la cantidad de flujo de calor necesario que necesita para fundir el polímero [29].

$$Q_{\text{int}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_a) \quad (34)$$

Dónde:

\dot{m} : Flujo másico del sistema [Kg/h]

C_p : Calor específico [Kcal/Kg °C]

T_s : Temperatura del polímero a la salida [°C]

T_a : Temperatura del polímero al ingreso [°C]

La potencia real de la resistencia se obtiene con la ecuación 35:

$$Q_{\text{real}} = Q - Q_r - Q_c \quad (35)$$

Dónde:

Q : Potencia entregada por las resistencias [W]

Q_r : Pérdida de energía por radiación [W]

Q_c : Pérdida de energía por convección [W]

5.6.1 Cálculo del coeficiente de convección

Se considera el cilindro y el husillo como un solo sistema, además se desprecia el aire que se encuentra en el interior del cilindro, la temperatura de fusión del PET es de 250°C, con estos datos se procede a determinar la temperatura media de película con la ecuación 36.

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (36)$$

Dónde:

T_s : Temperatura del cuerpo sólido de la superficie [°K]

T_a : Temperatura ambiente [°K]

$$T_f = \frac{(523.15^\circ K) + (293.15^\circ K)}{2}$$
$$T_f = 408.15^\circ K$$

Con los datos de la temperatura de película se procede a sacar las propiedades del aire a una temperatura de 135°C [30].

Propiedades del aire a 135°C

$$Pr = 0.704$$

$$\gamma = 2.74 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$k = 0.0337 \left[\frac{W}{m \times ^\circ K} \right]$$

Para determinar el coeficiente de convección, se considera que para este caso se tiene un sistema de convección natural, por lo que es necesario determinar el número de Grashof con la siguiente ecuación.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_a) \cdot L_c^3}{\gamma^2} \quad (37)$$

Dónde:

β : Coeficiente de expansión volumétrica [1/°K]

g : Aceleración gravitacional [m/s²]

T_s : Temperatura de la superficie [°C]

T_a : Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie [°C]

L_c : Longitud característica de la configuración geométrica [m]

γ : Viscosidad cinemática del fluido [m/s²]

Para determinar el coeficiente de expansión volumétrica se utiliza la ecuación mostrada a continuación.

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$
$$\beta = \frac{1}{408.15^\circ\text{K}} = 2.44 \times 10^{-3} [\text{K}^{-1}]$$

Se determina el número de Grashof:

$$\text{Gr} = \frac{9.8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 2.44 \times 10^{-3} [^\circ\text{K}^{-1}] \cdot (523.15 - 293.15) [^\circ\text{K}] \cdot 0.05^3 [\text{m}^3]}{(2.74 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right])^2}$$
$$\text{Gr} = 91.56 \times 10^4$$

Para determinar el aumento de la transmisión de calor se calcula el número de Nusselt con la ecuación (39), especificada en la tabla 9-1, del libro transferencia de calor [30].

$$\text{Nu} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 \text{Ra}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (38)$$

Dónde:

Pr : Número de Prant

Ra : Número de Rayleigh

Para determinar el número de Rayleigh, se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr} \quad (39)$$

$$Ra = 0.704 \cdot 91.56 \times 10^4$$

$$Ra = 6.44 \times 10^5$$

Si el número de Rayleigh cumple la condición $Ra \leq 10^{12}$ la ecuación 38 es la más acertada para determinar el número de Nusselt.

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 \cdot (6.44 \times 10^5)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{0.704} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$$

$$Nu = 12.75$$

Para calcular el coeficiente de convección natural, se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{\phi M} \quad (40)$$

$$h_c = \frac{12.75 \cdot 0.03374 \cdot \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]}{0.050 \cdot [m]}$$

$$h_c = 8.60 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

5.6.2 Cálculo del coeficiente de conducción

La superficie metálica del cilindro posee una buena conductividad térmica por lo cual es importante determinar el coeficiente de conducción basado en datos de emisividad del material, temperatura superficial y el área del cilindro, como se muestra en la ecuación 41.

$$h_r = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - Ta^4)}{(Ts - Ta)} \quad (41)$$

Dónde:

ε : Emisividad del acero a 523.15 °K = [0.6]

σ : Constante de Stefan-Boltzman= $5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4]$

T_s : Temperatura absoluta de la superficie [$^\circ\text{K}$]

T_a : Temperatura ambiente [$^\circ\text{K}$]

$$h_r = \frac{0.6 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4} \right] \cdot (523.15^4 - 293.15^4) [^\circ\text{K}^4]}{(523.15 - 293.15) [^\circ\text{K}]}$$

$$h_r = 9.98 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4} \right]$$

El coeficiente de transferencia del sistema es igual a la suma de los dos coeficientes calculados anteriormente.

$$h = h_c + h_r \quad (42)$$

$$h = (8.60 + 9.98) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4} \right]$$

$$h = 18.58 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4} \right]$$

5.6.3 Pérdidas de calor por conducción

Las pérdidas por conducción se desprecian debido a que los elementos que están en contacto directo con el husillo son los soportes y este es un valor mínimo.

5.6.4 Pérdidas por convección

Las pérdidas por convección se dan debido a las corrientes de aire externas al sistema, las cuales disminuyen la energía calorífica que ingresa al husillo.

$$Q_c = h_c \cdot \Delta T \cdot \pi \cdot \phi_M \cdot L \quad (43)$$

$$Q_c = 8.60 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}} \right] \cdot 230 [^\circ\text{K}] \cdot \pi \cdot 0.05 [\text{m}] \cdot 0.45 [\text{m}]$$

$$Q_c = 140 [\text{W}]$$

5.6.5 Pérdidas por radiación

Las pérdidas por efecto de la radiación se calculan con la ecuación 44.

$$Q_r = \pi \cdot \phi_M \cdot L \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (44)$$

$$Q_r = \pi \cdot 0.05[\text{m}] \cdot 0.45[\text{m}] \cdot 0.6 \cdot 5.68 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} \right] \cdot (523.15^4 - 293.15^4) [^\circ\text{K}^4]$$
$$Q_r = 162.65[\text{W}]$$

5.6.6 Potencia de entrada

La potencia de entrada es la necesaria que requiere el sistema para poder fundir el polímero, está definido por la capacidad de la máquina y el calor específico del material, se aplica la ecuación 45 y se tiene lo siguiente.

$$Q_{\text{int}} = m \cdot Cp \cdot (T_s - T_a) \quad (45)$$

$$Q_{\text{int}} = 5 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right] \cdot 1350 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right] \cdot (593.15 - 293.15) [^\circ\text{K}]$$
$$Q_{\text{int}} = 2025 \times 10^3 \left[\frac{\text{J}}{\text{h}} \right] \rightarrow 563[\text{W}]$$

5.6.7 Potencia de salida del sistema

Para sustentar que la selección de resistencias sea correcta, se debe comparar la potencia real que las resistencias le otorgan al sistema con respecto a la energía que sale del sistema, si esta es mayor quiere decir que las resistencias tendrán la capacidad necesaria para fundir el material.

$$Q_{\text{out}} = Q_r + Q_c + Q_{\text{int}} \quad (46)$$

$$Q_{\text{out}} = (162.5 + 140 + 563) [\text{W}]$$
$$Q_{\text{out}} = 865.5 [\text{W}]$$

Para la potencia real del sistema se plantea trabajar con 3 resistencias de 300 [W] cada una obteniéndose una potencia total de 100[W], con este dato se determina la potencia real requerida por el sistema, resolviendo la ecuación (16).

$$\begin{aligned} Q_{real} &= Q - Q_r - Q_c \\ Q_{real} &= (900 - 162.65 - 140) [\text{W}] \\ Q_{real} &= 597.35 [\text{W}] \end{aligned}$$

La potencia real es de 597.35 [W], comparando este resultado con la potencia que requiere el sistema para fundir el polímero 563 [W], esta es mayor lo que quiere decir que la selección de 4 resistencias de 300 [W] es correcta para que la extrusora cumpla con la capacidad de extrusión de PET reciclado.

5.7 Dimensionamiento de la boquilla

El espesor de pared del cabezal está definido al igual que el del cilindro como se muestra:

$$e_c = e_b = 10 [\text{mm}]$$

Para el largo de la boquilla, se utiliza un valor de 60 mm, tomando en cuenta el espacio necesario para que acople al cilindro mediante una rosca.

$$L_b = 60 [\text{mm}]$$

Para la punta de la boquilla, la longitud no debe ser relativamente larga para evitar pérdidas de presión en la salida del polímero extruido, el diámetro de la boquilla depende del tamaño de filamento que se requiere extruir.

$$L_{pb} = 20 [\text{mm}]$$

$$D_{pb} = 5 [\text{mm}]$$

Dónde:

L_{pb} : Largo de la punta de la boquilla [mm]

D_{pb} : Diámetro de la punta de la boquilla [mm]

El material seleccionado para la boquilla en este caso, se plantea usar el acero AISI 1018, generalmente este se utiliza en el mecanizado de piezas pequeñas y que no están sometidas a cargas altas de trabajo, en este se utiliza un eje de 50 mm de diámetro y 60 mm de longitud.

5.8 Selección de la transmisión de movimiento

En la etapa de diseño del husillo se determinó la potencia necesaria que requiere el sistema para su funcionamiento adecuado.

$$Pot = 0.273[\text{Hp}]$$

El valor requerido de potencia según los cálculos no es un valor exacto para la selección de motores trifásicos según en el catálogo, en este caso se trabaja con un motor de 0.5 [HP], con 1200 RPM, un par motor de 3.13 [Nm]. Con estos datos se procede a seleccionar la caja reductora, que permita disminuir la velocidad de giro del husillo.

$$i = \frac{N_{\text{int}}}{N} = \frac{1200[\text{RPM}]}{11[\text{RPM}]} = 109.1$$

Para la selección de la caja reductora, se considera que esta debe soportar una velocidad de entrada de 1200 [RPM], y como resultado se busca tener 11 [RPM] a la salida, según el catálogo mostrado en el anexo 7, la caja seleccionada es una de tornillo sin fin simple, MRS-MRT 85, ya que esta posee una relación de 1:100, un torque de 210 [Nm] y una potencia de 0.75 [Hp].

$$N_{\text{out}} = i_{\text{real}} \cdot N_{\text{int}} \quad (47)$$

$$N_{\text{out}} = 100 \cdot 1200[\text{RPM}] \rightarrow 12[\text{RPM}]$$

Es importante que el resultado del torque real comparado con el calculado debe ser mayor, el cual se cumple con la siguiente condición.

$$\begin{aligned} T_{\text{real}} &\geq T \\ 210[\text{Nm}] &\geq 184[\text{Nm}] \end{aligned}$$

La velocidad real del sistema es de 12 [RPM] con la caja reductora seleccionada, de esta manera se busca cumplir con la capacidad inicial de la máquina ya que si se trabaja con velocidades menores a la calculada se puede afectar el resultado de capacidad.

5.9 Diseño de la estructura

Para el diseño de la estructura, se considera las cargas a las que esta está sometida, en este caso cargas por el peso de los componentes y las cargas verticales por efecto de la presión ejercida en el husillo.

$$W_t = W_1 + W_2 \quad (48)$$

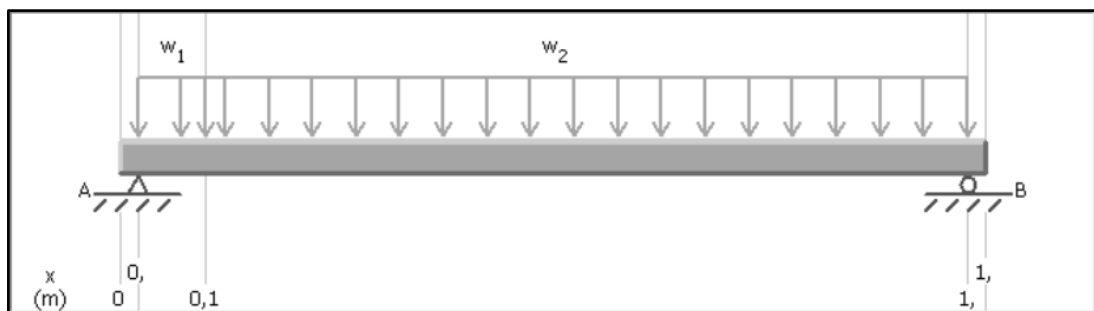
Dónde:

W_1 : Carga distribuida por efecto del peso de los componentes de la extrusora [N/m]

W_2 : Carga distribuida por efecto de la presión ejercida en el husillo [N/m]

$$W_t = 461\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right] + 909\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right] = 1370\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$$

Con el valor de carga distribuida a lo largo de un perfil estructural, se realiza el análisis estático como se muestra en la figura 33, para determinar el momento máximo ejercido sobre el perfil que se va a seleccionar.



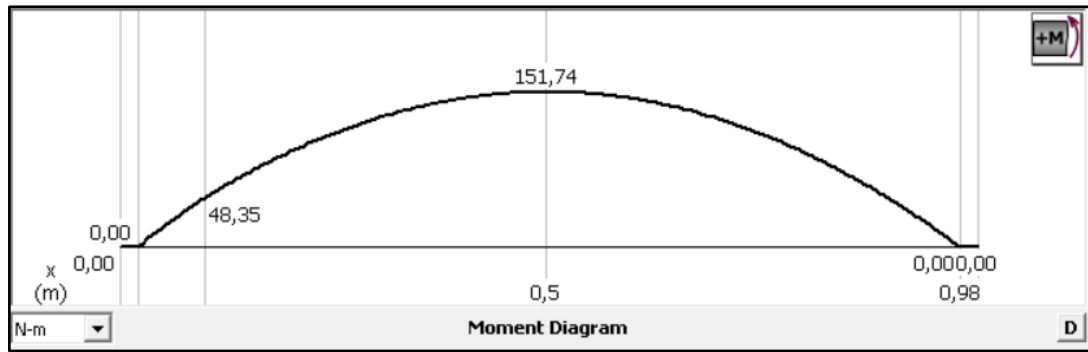


Figura 33. Análisis estático en el perfil de la estructura.

Para seleccionar un perfil adecuado que soporte las cargas distribuidas, se determina el módulo de la sección transversal con la ecuación 49.

$$S = \frac{M_{\max}}{\sigma} \quad (49)$$

Dónde:

M_{\max} : Momento máximo de flexión 151.74 [N-m]

σ : Esfuerzo límite de flexión acero ASTM A36 [Ksi]

El manual de aceros para la construcción [31], recomienda utilizar el factor de 0.66 para determinar el esfuerzo límite de fluencia del material en vigas, como se muestra en la ecuación 50.

$$\sigma = 0.66 \cdot S_y \quad (50)$$

$$\sigma = 0.66 \cdot 34[\text{Ksi}] = 24[\text{Ksi}]$$

El momento máximo en unidades de [Lb-plg] es el siguiente:

$$M_{\max} = 151.74[\text{N-m}] = 1343[\text{Lb-plg}]$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 49, se tiene el siguiente resultado para el módulo de la sección.

$$S = \frac{1343[Lb-plg]}{24000[\frac{Lb}{plg^2}]} = 0.056[plg^3]$$

El valor obtenido, se compara con un perfil de la tabla de perfiles del manual de la AISC, mostrado en el anexo 8, en este caso se debe buscar un perfil que posea el mismo módulo de la sección calculado o a su vez que sea mayor, por lo que se seleccionó el perfil de tubo cuadrado de 1 1/8 pulgadas por 3/16 pulgadas de espesor que posee un módulo de sección de 0.641 [plg³] el cual supera al valor calculado, de esta manera se sustenta que el perfil seleccionado es adecuado para el diseño de la estructura.

5.9.1 Dimensionamiento de la estructura

Para el dimensionamiento de la estructura, se considera un diseño el cual le brinde a la máquina la resistencia adecuada de los componentes, además de una buena estabilidad que le permita trabajar de manera adecuada, en la figura 34 se muestra a detalle el diseño y dimensiones que debe tener la estructura principal.

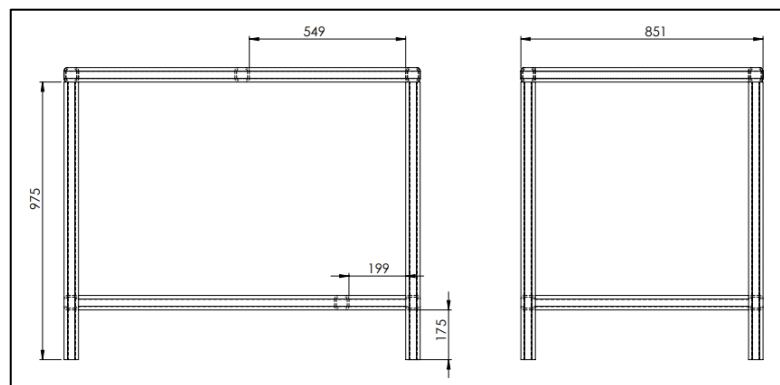


Figura 34. Dimensiones de la estructura principal.

5.10 Cálculo de la soldadura

El cálculo de la soldadura, permite comprobar si la estructura una vez armada mediante cordones de soldadura, es capaz de soportar las cargas de trabajo que ejerce los componentes de la máquina sobre la estructura.

Para determinar el esfuerzo que ejerce los componentes de la máquina sobre la estructura, se utiliza la ecuación 51.

$$\sigma = \frac{W_t}{A_s} \quad (51)$$

Dónde:

W_t : Carga total distribuida sobre la estructura [N]

A_s : Área del cordón de soldadura [mm]

$$A_s = 1.414h \cdot d \quad (52)$$

Dónde:

h : Altura del cordón de soldadura [mm]

d : Longitud del cordón de soldadura [mm]

$$A_s = 1.414 \cdot (4\text{mm}) \cdot (50.8\text{mm})$$

$$A_s = 232,5 \text{ mm}^2$$

Resolviendo la ecuación 51, reemplazando los valores calculados, se tiene lo siguiente:

$$\sigma = \frac{1370 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot (0.851\text{m})}{2.32 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$\sigma = 4.96 \text{ MPa}$$

$$415 \text{ MPa} \geq 4.96 \text{ MPa}$$

El resultado obtenido se compara con el esfuerzo de fluencia del electrodo E-6011, el cual es mayor por lo que se asume que los cordones de soldadura son adecuados para soportar las cargas aplicadas en la estructura.

5.11 Selección de termocuplas

La termocupla de la figura 35, son sensores de temperatura principalmente utilizados en la industria de polímeros, este elemento consta de dos alambres de metales diferentes, unidos

en un extremo soldado, al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño, el mismo que aumenta conforme la temperatura sea mayor [32].



Figura 35. Termocupla tipo arandela [32].

Para este caso se recomienda utilizar la termocupla tipo arandela, ya que estas son adecuadas para el uso continuo en vacío, en atmósferas oxidantes y el rango de temperaturas va desde 0 a 370 °C como se muestra en el anexo 9, es adecuado para el funcionamiento de la máquina extrusora [32].

5.12 Controlador de temperatura

Los controladores de temperatura como el de la figura 36, permite manipular la temperatura en función de un rango de trabajo requerido, tiene una entrada procedente de un sensor en este caso las termocuplas, y una salida que está conectada a un elemento de control, el proceso se realiza mediante la comparación de la temperatura real y la temperatura de control deseada, esto proporciona la salida al elemento de control [33] Para este caso se utilizará un controlador de la serie TX, el cual permite trabajar en rangos de -50 a 1200 °C con la termocupla tipo K seleccionada anteriormente, cuenta con una precisión en la visualización de $\pm 0.3\%$ correspondiente al margen de error.



Figura 36. Controlador de temperatura TX [33].

CAPÍTULO III

VALIDACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 Generalidades

Lo que corresponde al Capítulo III es la validación de los resultados obtenidos en cálculos, mediante un software especializado para determinar el comportamiento del tornillo, sometido a diferentes esfuerzos y de esta manera obtener un factor de seguridad óptimo para el sistema.

También se realizará un análisis financiero para determinar el impacto económico que genera la fabricación de la máquina y su tiempo de recuperación utilizando identificadores financieros como la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN).

6.2 Análisis estático del tornillo

Para sustentar los cálculos realizados, es necesario utilizar los software especializados (Solidworks), de manera que se pueda evaluar los resultados obtenidos en el cálculo y en la simulación, a su vez determinar si el diseño es óptimo para su funcionamiento.

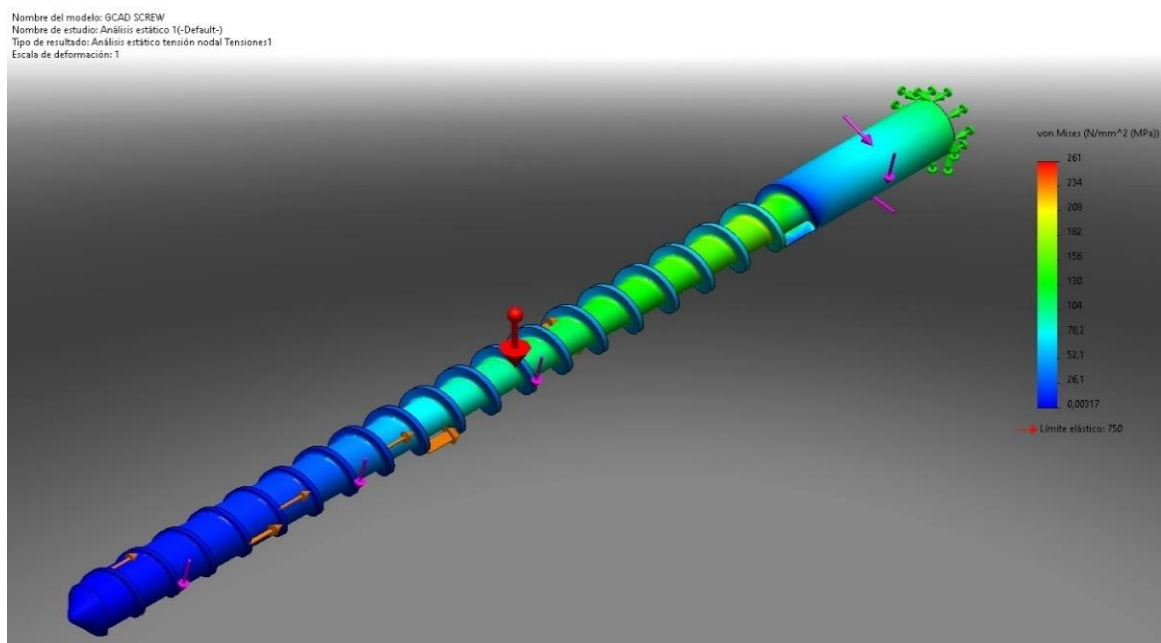


Figura 37. Esfuerzos de Von Mises determinados en el tornillo.

Según los resultados obtenidos en el análisis estático mostrado en la figura 37, el diámetro seleccionado para el tornillo, es adecuado ya que este no sobrepasa el límite de fluencia del material AISI 4140.

$$S_y \geq \sigma'$$

$$414[\text{MPa}] \geq 73.4[\text{MPa}]$$

6.2.1 Factor de seguridad calculado en Solidworks

Para el caso del factor de seguridad en software de diseño Solidworks, permite calcular los puntos más críticos del tornillo, en base a estos datos nos da un valor de factor de seguridad promedio del diseño.

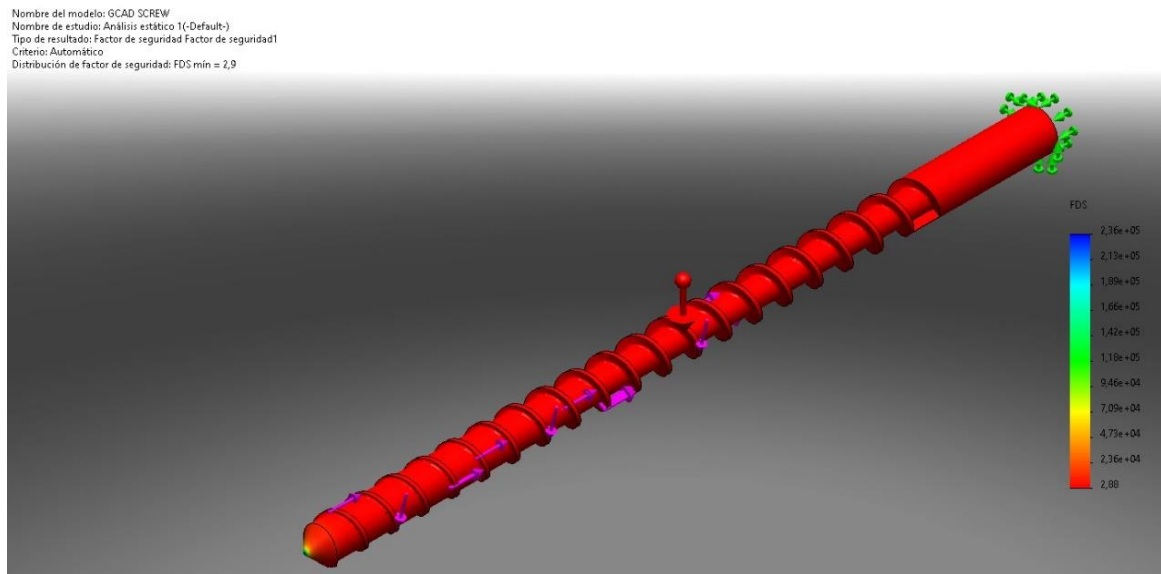


Figura 38. Resultados del factor de seguridad del tornillo.

En la figura 38, se puede apreciar al eje de color rojo, lo cual indica que este tiene un valor de 2.88, el valor determinado en la simulación y en el cálculo son muy aproximados, por lo tanto, el diámetro seleccionado para el eje es adecuado para el funcionamiento de la extrusora.

6.3 Análisis estático en la estructura

Para en análisis de la estructura, se determina el esfuerzo máximo de flexión que se tiene en los perfiles cuadrados armados, los que soportan el peso y la fuerza de trabajo de los componentes de la máquina, en la figura 39 se puede observar que el esfuerzo máximo que se obtiene por efecto de la carga distribuida es de 21 MPa y el límite de fluencia para el acero ASTM A36 es de 250 MPa, por lo que la estructura es adecuada en este diseño.

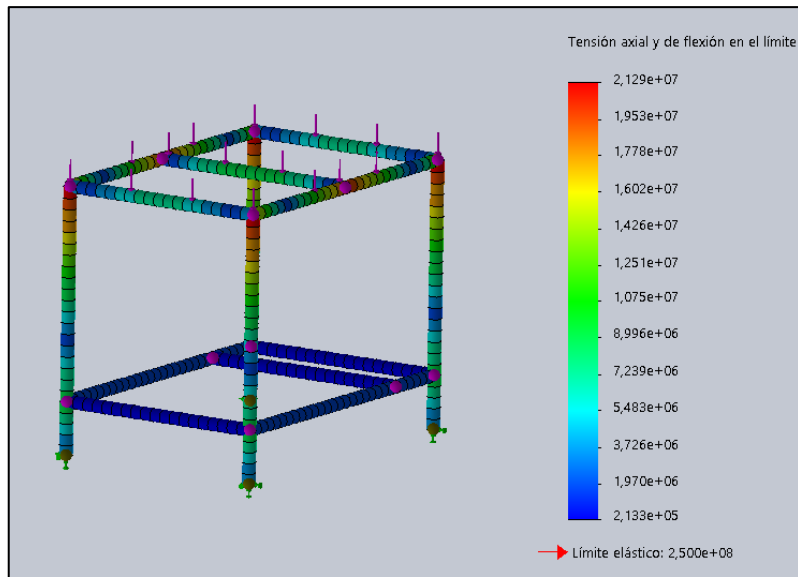


Figura 39. Resultados del esfuerzo de flexión en la estructura.

Para el caso del factor de seguridad como se muestra en la figura 40, se tiene un valor promedio de 11,7 el cual es bastante alto, esto debido a que el perfil seleccionado es lo suficientemente robusto para brindar estabilidad a la máquina una vez que entre en funcionamiento, además de resistencia mecánica.

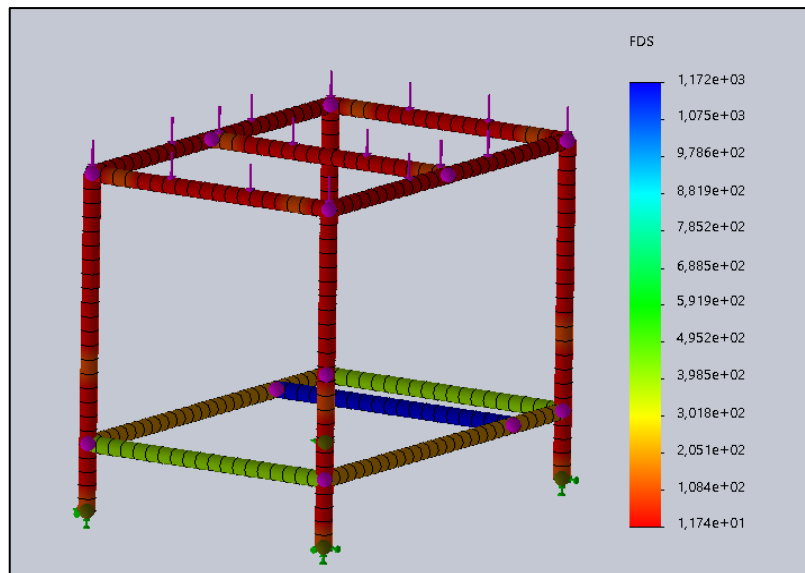


Figura 40. Resultados del factor de seguridad en la estructura.

6.4 Pruebas de funcionamiento y toma de resultados

Para poner en operación la máquina se debe realizar un precalentamiento de las 3 zonas de hasta alcanzar una temperatura de operación de 200[°C] aproximadamente con el motor apagado en la figura 41 se describe el comportamiento de la temperatura a lo largo de las zonas de extrusión.

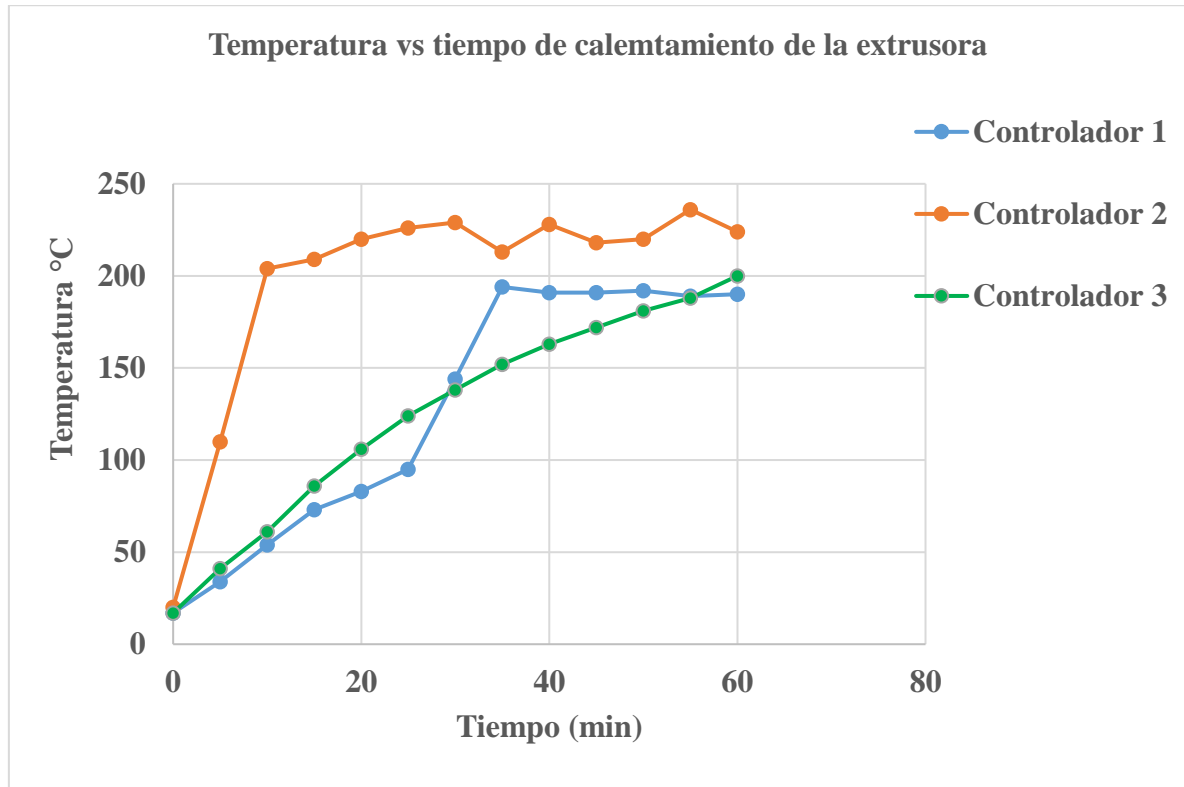


Figura 41. Curva de calentamiento.

En la figura 41 se puede apreciar que existe variabilidad en el tiempo de calentamiento de las resistencias, el controlador 1 se encarga de controlar la resistencia ubicada en la zona de alimentación, este tarda un tiempo alrededor de 36 minutos para alcanzar la temperatura de operación, en controlador 2 ubicado en la zona de compresión tarda 10 minutos en alcanzar los 200 [°C], por último con el controlador 3 se alcanza los 200[°C] en 60 [min], siendo este el que más tiempo se tarda en alcanzar la temperatura de operación.

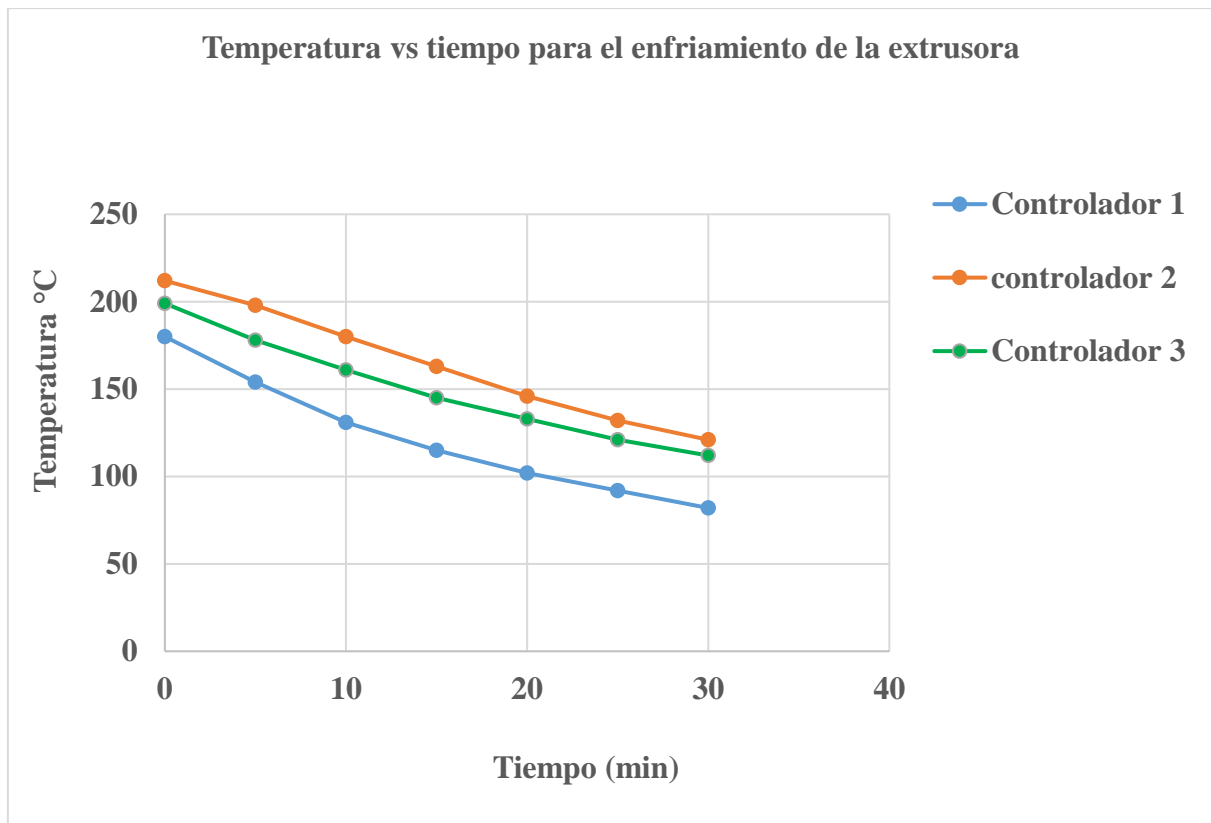


Figura 42. Curva de enfriamiento.

La siguiente gráfica muestra la tendencia de la curva correspondiente al enfriamiento de la máquina extrusora en un lapso de tiempo, se puede concluir que esta tarda alrededor de 30 minutos para enfriarse y la tendencia es constante en los tres controladores de las respectivas resistencias, si se plantea colocar un aislamiento en la máquina el tiempo de enfriamiento puede tardar más, pero beneficiaría para alcanzar temperaturas de operación en menor tiempo.

6.4.1 Pruebas de funcionamiento

Para la toma de resultados se considera que la máquina debe extruir 200[g] en 2.40 [min] para de esta manera satisfacer el caudal de 5 [kg/h] con el que se diseñó la máquina.

En la tabla 24 se detalla las pruebas realizadas con material virgen y material reciclado de PET, cada toma con velocidades diferentes y temperaturas seteadas en los controladores (C):

$$C_1 = 200^{\circ}C$$

$$C_2 = 220^{\circ}C$$

$$C_3 = 210^{\circ}C$$

Tabla 24. Datos de las pruebas de funcionamientos.

Datos de pruebas							
Toma N°	Masa [g]	Tiempo [min]	rpm	T° C3	T° C2	T° C1	Observaciones
1	200	10.22	58	210	218	181	Material reciclado
2	200	5.32	64	215	227	196	Material reciclado
3	200	3.19	64	212	245	202	Material reciclado
4	200	11.45	64	213	221	203	Material reciclado
5	200	3.39	58	213	223	203	Virgen + reciclado 50/50
6	200	2.18	70	219	255	202	PET virgen
7	200	14.11	73	210	222	198	Material reciclado
8	400	16.27	70	211	231	204	Material reciclado

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Según los datos descritos en la tabla 24, en la prueba número 3 se observa que el tiempo de extrusión es de 3.19 [min] debido a los siguientes factores.

- La forma, tamaño y peso del PET reciclado influye de manera significativa en la cantidad del flujo dentro de la zona de alimentación.
- La temperatura de fusión del PET es de 180 [°C] a diferencia del material reciclado que es de 230 [°C].
- El peso del material reciclado es menor a la virgen, por lo cual que requiere que la tolva se encuentre al 100% de su capacidad.

Para obtener una extrusión de 200[g] en 2.40 [min] se requiere aumentar la velocidad de extrusión, lo cual no es aconsejable ya que se generan burbujas debido a que el material fundido pasa de un flujo laminar a turbulento.

Según la toma número 6 el cual se realizó con material virgen y a una velocidad de 70 [rpm] y una temperatura en la zona de fusión seteada a 240[°C], el tiempo de extrusión es de 2,18[min] superando el caudal para el que fue diseñada la máquina.

6.5 Consumo eléctrico de la máquina

Para la verificación del consumo kW/h de la máquina se considera que el tiempo de trabajo es de 8 [h] para 5 días semanales con un operador.

La máquina está compuesta por un motor de 2 [hp] y 4 resistencias de 300 [W], por lo cual el consumo total se calcula de la siguiente forma:

Datos:

$$2[hp] = 1491.4[W]$$

$$4 \text{ resistencias} = 1200[W]$$

$$\text{Consumo Total} = 1200 + 1491.4 = 2691.4[W] \approx 2.681[kW]$$

Sabiendo que el consumo comercial en el Ecuador es de 0.02 \$ por kilovatio hora tenemos:

$$2.691[kW \cdot h] \cdot 0.02\$ = 0.05\left[\frac{\$}{h}\right]$$

$$0.05\left[\frac{\$}{h}\right] \cdot 8[h] = 0.43\left[\frac{\$}{\text{día}}\right]$$

$$0.43\left[\frac{\$}{\text{día}}\right] \cdot 20[\text{días}] = 8.60\$$$

6.5.1 Costo de operación

Se contrata un operador con un sueldo básico de 400\$ mensuales, el costo de operación en un día de 8 horas se define de la siguiente forma:

$$\text{Sueldo diario} = \frac{400\$}{30 \text{ días}} = 13.33\left[\frac{\$}{\text{día}}\right]$$

$$\text{Costo de operación} = 13.33 + 0.43 = 13.76 \frac{\$}{\text{día}}$$

6.6 Análisis financiero y económico

Para estimar el costo total que implica el diseño y la fabricación de la extrusora de plástico, se debe considerar tanto los costos directos como indirectos, los cuales se dividen de la siguiente manera:

Costos directos

- Costo de diseño
- Costo de materia prima
- Costo de fabricación y maquinado
- Costo de mano de obra

Costos indirectos:

- Costos no recuperables
- Costos de materiales consumibles

6.6.1 Costos directos

En terminología empresarial denomina a cualquier costo que se puede asociar directamente a la producción de un solo material, y que sólo debe conformar en la contabilidad de costos de este producto.

6.6.2 Costo de diseño

En el costo de diseño se considera el tiempo total que se tarda en dimensionar y calcular los componentes correspondientes a la máquina extrusora, en la tabla 25 se muestra los detalles.

Tabla 25. Costo total del diseño de la máquina.

Horas de trabajo	Costo por hora
40	\$10.00
Total	\$400.00

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

6.6.3 Costo de materia prima

La materia prima se refiere al material necesario para fabricar los diferentes componentes que posee la máquina, son los elementos que se requieren maquinar para ser utilizados en el ensamble de la máquina en la tabla 26 se detallan los siguientes:

Tabla 26. Costo total de materia prima para fabricación y mecanizado

Costo de materia prima para fabricación

Denominación	Cant.	Material	Dimensiones [mm]	Costo [\$]
Plancha (Tolva de almacenamiento)	1	AISI 1018	1220 X 2440	\$ 35,00
Eje (Tornillo extrusor)	1	AISI 4140	Ø32 X 600	\$ 10,00
Perfiles (Estructura)	3	AISI 1018	30 X 30 X 3	\$ 44,61
Boquillas	3	AISI 1018	Ø50 X 150	\$ 10,00
Cilindro perforado	1	AISI 4140	Ø50 X 30 X 600	\$ 20,00
Bridas	3	AISI 1018	3/8 X 400 X 400	\$ 36,00
Bridas	2	AISI 1018	3/8 X 200 X 200	\$ 12,00
Pintura	1/4	Anticorrosiva	N/A	\$ 12,00
Regatones	4	plástico	1 1/4	\$ 6,00
Placa base	1	AISI 1018	520 X 1020 X 3	\$ 60,00
TOTAL				\$ 245,61

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

En cuanto a materia prima correspondiente a elementos normalizados, en la tabla 27 se detallan los diferentes componentes.

Tabla 27. Costo total de materia prima de elementos normalizados

Costo de elementos normalizados					
Denominación	Cant.	Dimensión/ Capacidad	Valor unitario [\$]	Valor total [\$]	

Matrimonio	1	2"	\$ 18,00	\$ 18,00
Resistencias tipo abrazadera	5	2" – 300W	\$ 15,36	\$ 76,80
Fibra de vidrio	1	AFT-250	\$ 7,00	\$ 7,00
Pernos, arandelas, tuercas, brocas	1	1/4 – 3/8 – 5/16	\$	\$ 15,07
Motor-reductor (Siemens)	1	2 HP	\$ 790,00	\$ 790,00
TOTAL				\$ 906,87

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

Al igual que la materia prima para elementos normalizados, se detalla en la tabla 28 los valores correspondientes a los componentes eléctricos utilizados.

Tabla 28. Costo total de materia prima para materiales eléctricos.

Costo de materiales eléctricos				
Denominación	Cant.	Dimensión/ Capacidad	Valor unitario [\$]	Valor total [\$]
Controlador de temperatura	3	110 V	\$ 61,20	\$ 183,60
Pulsadores tipo hongo	2	110 V	\$ 2,68	\$ 5,36
Cable	5	10 AWG	\$ 1,43	\$ 7,15

Paro de emergencia	1	110 V	\$	1,75	\$	1,75
Gabinete metálico						
doble fondo	1	42 x 40 x 20 cm	\$	37,87	\$	37,87
Contadores	2	4 HP 220 V – 12A	\$	9,38	\$	9,38
Selector 2 posiciones	2	110 V	\$	1,72	\$	3,44
Breakers	2	3P 25A - 1P 6A	\$	N/A	\$	11,94
Terminales, borneras, topes	1	un	\$	N/A	\$	25,81
Pernos						
autoperforantes,	25	M8 x 10mm	\$	0,28	\$	7,00
Amarras, barra equipotencial,						
canaleta ranurada,						
riel din	1	un	\$	N/A	\$	16,43
Potenciómetro	1	5 k ohms	\$	23,40	\$	23,40
Relés de control +		220V – 10A – 2NA-				
base para relé	3	2NC – 8 pines	\$	5,26	\$	15,78
Cable termocupla	5	Tipo K (m)	\$	6,71	\$	33,55
Variador de velocidad	1	2HP 220V trifásico	\$	480,00	\$	480,00
TOTAL					\$	862,46

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

6.6.4 Costo de fabricación y mano de obra

Para determinar el costo de fabricación de los elementos que se deben mecanizar, se analiza el valor por horas que cuesta utilizar cada una de las diferentes máquinas que permitan realizar cada una de las piezas que conforman la máquina, dichos costos se detallan en la tabla 29.

Tabla 29. Costo total de fabricación y mano de obra.

Costo de fabricación y mecanizado

Denominación	Cant.	Fresadora universal [H]	Dobladora [H]	Torno [H]	Suelda MIG [m]	Costo [\$]
Tolva de almacenamiento	1		1			\$ 20,00
Tornillo extrusor	1	1		6		\$ 650,00
Estructura	1	1			1	\$ 60,00
Boquilla	3			1		\$ 75,00
Cilindro perforado	1	2		2		\$ 200,00
Brida de camisa	2	2		1	0,5	\$ 54,00
Tubo de alimentación	1	2		1		\$ 100,00
Placa base	1	1			0,5	\$ 17,50
Instalación eléctrica	1					\$ 200,00
TOTAL						\$ 1376,50
Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.						

El valor de costos directos totales para la fabricación de la máquina extrusora, se lo determina sumando todos los valores de las tablas anteriores y se tiene el valor total mostrado en la tabla 30.

Tabla 30. Costos directos totales de la máquina extrusora.

Costos directos	
Denominación	Valor [\$]
Costo total de materia prima	\$ 245,61
Costo total de elementos normalizados	\$ 906,87

Costo total de materiales eléctricos	\$ 862,46
Costo total de fabricación	\$ 1376,50
Total	\$ 3391,44

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

6.6.5 Costos indirectos

Son los que se producen en el transcurso de fabricación o servicio que no pueden ser asociados al producto.

En el caso de la fabricación de una máquina se puede decir que los costos indirectos son los consumibles los cuales se utilizan en la fabricación y montaje.

6.6.6 Costos no recuperables

Este tipo de costos contemplan a los que son difíciles de cuantificar por hora o no es factible hacerlo, dentro de estos tipos de costos se encuentran las herramientas o accesorios utilizados para la fabricación de un producto. En la tabla 31 se detalla cada uno de estos.

Tabla 31. Detalle de costos no recuperables			
Costos no recuperables			
Detalle	Periodo de trabajo	Valor Hora (USD)	Total (USD)
Taladro de pedestal	15	3.5	52.5
Cortadora	20	2.5	50
Cizalla	5	1.5	7.5
Esmeril	15	1	15
Amoladora	8	0.9	7.2
Instrumentación de medida	80	0.4	32
Baroladora	3	2.5	7.5

Total	171.70
--------------	---------------

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

6.6.7 Costos de elementos consumibles

Estos elementos son todos los materiales destinados a degradarse con el uso y no se pueden identificar con el producto terminado, estos elementos son difíciles de cuantificar debido a que no se puede estimar la cantidad exacta que se puede usar en la fabricación y montaje, en la tabla 32 se muestra los diferentes elementos que corresponden a este tipo de costos.

Tabla 32. Costos de elementos consumibles

Costos de elementos consumibles			
Detalle	Cantidad usada	Valor unitario (USD)	Total (USD)
Lijas N° 150	10	0.45	4.5
Guantes	2	1.5	3
Antiparras	2	4	8
Kilo de electrodos	2	12	24
Disco de corte	1	5	5
Disco de esmerilar	1	5	5
Guaípe	20	0.1	2
Total			51.50

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

6.7 Análisis financiero

Para el análisis financiero, se considera la utilidad neta que la máquina puede brindar al ser implementada, en este caso considerando que la producción de filamento para impresoras 3D tiene un costo de 25 [\$ /kg], las ventas generadas al año tienen un promedio de \$15000 tomando en cuenta este valor, se realiza el respectivo flujo de caja para determinar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión inicial de la máquina, que en este caso la inversión fue de \$ 3700 sumando los costos directos e indirectos, dichos detalles se especifican en la tabla 33.

Tabla 33. Análisis financiero.

Flujo de caja

Detalle	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Ingresos		\$15000	\$15000	\$15000
Gastos y costos				
Costos operacionales		\$4800	\$4800	\$4800
Gastos operacionales		\$1500	\$1500	\$1500
Gastos no operacionales		\$4800	\$4800	\$4800
Depreciación		\$515.4	\$515.4	\$515.4
Totalidad de costos y gastos		\$11615.4	\$11615.4	\$11615.4
Utilidad antes de impuestos y participación		\$3384.6	\$3384.6	\$3384.6
Utilidad Trabajadores		\$507.69	\$507.69	\$507.69
Utilidad antes de impuestos y partición		\$2876.91	\$2876.91	\$2876.91
Impuesto a la renta 25 %		\$719.23	\$719.23	\$719.23
Utilidad neta		\$2157.68	\$2157.68	\$2157.68
Depreciaciones		\$5151.4	\$5151.4	\$5151.4
Inversión inicial	3700			
Flujo neto	-3700	\$1642.28	\$1642.28	\$1642.28
			TASA	16%
			VAN	\$3688.39
			TIR	16 %
			PBP	2.25

Elaborado por: Campos David & Caraguay Emilio.

El flujo de caja se realiza considerando los tres primeros años, con la utilidad que la máquina cada año, se tiene un valor actual en el primer año de \$1642.28, en los resultados obtenidos y evaluando la implementación con una tasa del 16 %, se tiene un VAN de \$3688.39 en los tres años del flujo de caja, un TIR con un valor positivo del 16 % lo que indica que es viable la implementación de una máquina extrusora y el periodo de recuperación el cual es de 2 años y medio aproximadamente, estos valores se encuentran dentro de los parámetros establecidos para que la inversión sea factible.

Conclusiones

Una vez finalizado el diseño, construcción y funcionamiento de la máquina extrusora de plástico, se presentan las siguientes conclusiones obtenidas durante el periodo de realización del proyecto.

- El diseño del tornillo si fin consta de parámetros importantes para un correcto funcionamiento de acuerdo a la capacidad inicial de la máquina, en este caso se considera utilizar una relación L/D de 15:1, para un mejor funcionamiento de extrusión de PET.

- El tornillo consta de tres zonas de importancia para el correcto funcionamiento de la máquina extrusora, en este caso se consideró para la zona de alimentación 225 mm, la zona de compresión 112 mm y la zona de dosificación de 112 mm, esto con el fin de obtener un mayor rendimiento de la máquina cumpliendo con la capacidad inicial.
- La selección de materiales para la fabricación de componentes críticos como es el caso del tornillo sin fin, se utilizó un acero bonificado con aleaciones que le permiten obtener una mayor resistencia al desgaste por fatiga mecánica, en este caso el acero AISI 4140, que posee un esfuerzo límite de fluencia de 400 MPa, le proporciona al diseño un factor de seguridad confiable de 2.8.
- Mediante las pruebas experimentales, se pudo evidenciar que según el cálculo de transferencia de calor el tiempo que la máquina tarde en llegar a la temperatura de trabajo 190 °C, es de 20 minutos, en las pruebas experimentales una vez colocado el aislamiento en el cilindro, se pudo reducir el tiempo al 50 % del que se tenía inicialmente.
- El análisis financiero muestra que la inversión de este tipo de máquinas es viable ya que la inversión inicial no es elevada y el producto final que se obtiene tiene un precio aceptable en el mercado, con lo cual para tener valores positivos se requiere producir 50 rollos de filamento de PET para impresoras 3D, para obtener una ganancia que permita recuperar la inversión de \$ 3700 en menos de dos años.

Recomendaciones

- Para operar de forma segura se debe utilizar el equipo de protección personal y guantes de cuero para manipular la máquina en la zona de alta temperatura.
- Se recomienda limpiar el dado cada vez que se vaya a extruir, ya que, puede causar un atasco o contaminar el material extruido con otros materiales.
- El tamaño máximo del pellet debe no ser mayor a 6 mm para que el flujo del material en la zona de alimentación sea constante y tenga una extrusión continua.

- La temperatura del entorno de trabajo de la maquina debe mantenerse a una temperatura de 14 a 45 °C con una humedad relativa del 20% al 80%.
- La máquina debe encontrarse lejos de lugares corrosivos e inflamables, lejos de solventes orgánico y de alta iluminación.
- Llevar un registro de los mantenimientos preventivos según el anexo 10 y limpiar los dispositivos de inyección para evitar atascos cada vez que se vaya a extruir.

Referencias

- [1] F. L. Carrasquero, «Fundamentos de polímeros,» *www.researchgate.net*, pp. 1,50-57, 2014.
- [2] EcuareRed, «www.ecured.cu,» MediaWiki, [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/Polímero>. [Último acceso: Marzo 2021].
- [3] M. A. Maldonado Castro, «Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1 kg/h, diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del PET,» *repositorio.espe.edu.ec*, 2008.
- [4] Ecoologic, «www.ecoologic.com,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ecoologic.com/reciclaje-de-pet>.

- [5] A. L. Andrés Amaya, *Planta de transformación de plástico recuperado PET, PEAD y PEBD, en la ciudad de Bogotá D.C.*, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [6] R. Cifuentes, «Repositorio de la Universidad del Valle,» 13 Mayo 2011. [En línea]. Available:
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10893/4727/CB-0441201.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 3 Marzo 2021].
- [7] J. L. Leiva Chacón, «Caracterización y reciclado por extrusión del EVA de desecho ETIL VINIL ACETATO,» *Repositorio ESPE*, 2010.
- [8] L. Batte Zhengzhou Machinery Co., «www.batte.biz,» BATTE, 2016. [En línea]. Available: <http://www.batte.biz/news/technology/37.html>. [Último acceso: 3 Marzo 2021].
- [9] T. d. conformación, «constructor.educarex.es,» [En línea]. Available: <https://constructor.educarex.es/odes/otros/agora2007/PLASTICOSWEB/EXTRUSION.html>. [Último acceso: Marzo 2021].
- [10] Mariano, «Extrusión de materiales plasticos,» *Tecnología de los plásticos* , 2011.
- [11] T. e. polímeros, «todoenpolimeros.com,» wordpress.com, 2020. [En línea]. Available: <https://todoenpolimeros.com/procesos-de-extrusion/>. [Último acceso: Marzo 2021].
- [12] J. G. Jimmy Gómez, «Diseño de una extrusora para plásticos,» *Universidad Tecnológica de Pereira*, 2007.
- [13] Siemens, *Motorreductores MOTOX*, 2008.
- [14] Weg Motores , *W50- La generación de motores WEG para aplicaciones severas.*, Río de Janeiro, 2021.
- [15] G. H. Acuña Fonseca y M. E. Salamanca Vanegas, *Diseño y construcción de una máquina extrusora para la fabricación de filamentos termoplásticos para impresora 3d*, Tunja, 2016.
- [16] C. A. García Acevedo , *Diseño de una extrusora para filamento de impresión 3D*, Santiago De Chile , 2015.
- [17] R. X. Morales Iles , *Diseño y construcción de una máquina recicladora de plástico PLA para el observatorio astronómico de Quito en la EPN*, Quito , 2018.

- [18] B. A. Carol Piñeros, *Rediseño de una máquina extrusora para reciclaje de plástico producido en la facultad tecnológica de la UD*, Bogotá, 2019.
- [19] G. L. Jefferson Guerra, «Máquina tensora y tina de enfriamiento para la fabricación de mangueras con plástico reciclado,» *Universidad Técnica del Norte*, 2018.
- [20] J. L. Maldonado Flores, *Aceros y sus aplicaciones*, San Nicolas De Los Garza , 1996.
- [21] (SUMAIND) Suministros y Materiales Industriales, *Aceros*, Quevedo , 2016.
- [22] F. Belzuce, *Aceros y fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones*, Mexico D.F., 2001.
- [23] MENTIVEST , «AceroS ASTM A 36,» 2006.
- [24] INDURA , «Manual de sistemas y materiales de soldadura,» Quito , 2018.
- [25] H. R. Galbarro, «ingemecanica.com,» 19 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html>.
- [26] R. Budynas y K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Mexico D.F., 2010.
- [27] V. Savgorodny, *Transformación de plásticos*, Gustavo Gili S.A., 1973.
- [28] H. A. Andrade Gabriela, *Diseño y construcción de una máquina dosificadora de shampoo con capacidad de 100 litros/hora para la "Fundación Familia Salinas"*, Quito, 2019.
- [29] C. F. Ortiz Abata , *Diseño y construcción de una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado*, Latacunga , 2018.
- [30] Y. Cengel y A. Ghajar , *Transferencia de calor y masa Fundamentos y aplicaciones*, Mexico D.F: Mc Graw Hill , 2011.
- [31] America Institute Of Steel Construction, *Manual of Steel Construction Allowable Strees Design.*, 2011.
- [32] DISETEC, «www.disetec-ec.com,» Amenestudio.net , 2018. [En línea]. Available: <http://www.disetec-ec.com/equipo-insumo-solucion-industrial-instrumento-medicion-quito-ecuador.php?recordID=608>.
- [33] ACOTRON, «www.acotron.com,» Electrónica Industrial S.A., 2021. [En línea]. Available: https://www.acotron.com/index.php?route=product/product&product_id=11649.

- [34] P. R. SALAZAR, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MICRO EXTRUSORA EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE MULTI COMBUSTIBLES A PARTIR DE BIOMASA, CON CAPACIDAD DE COMPACTACIÓN DE 0.2 KG,» *Repositorio ESPE*, 2016.
- [35] Termosensores S.A., «Techrun,» [En línea]. Available: <https://www.techrun.com.ec/assets/pdf/productos/17e6f178fcfa781f967286f306070224.pdf>. [Último acceso: 17 06 2021].
- [36] Omega a spectris company, «Controladores de temperatura,» [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html>. [Último acceso: 17 06 2021].

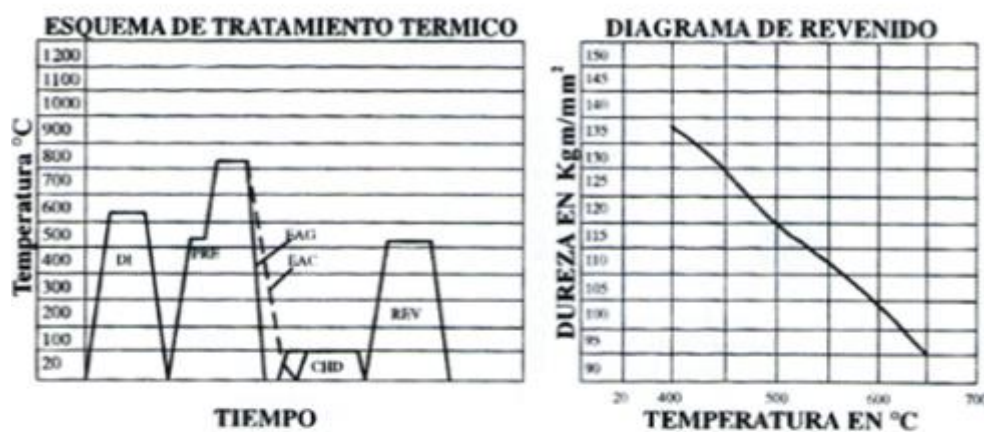
ANEXOS

Anexo 1: Planos

Anexo 2: Catálogo acero AISI 4140

ACERO SAE 4140

Color de Identificación: Verde/Rojo



REDONDO

20 mm	(3/4")	130 mm	(5")
25 mm	(1")	135 mm	(5.1/4")
28 mm	(1.1/8")	150 mm	(5.3/4")
32 mm	(1.1/4")	160 mm	(6.1/4")
35 mm	(1.3/8")	170 mm	(6.1/2")
38 mm	(1.1/2")	180 mm	(7")
40 mm	(1.9/16")	200 mm	(7.3/4")
45 mm	(1.3/4")	210 mm	(8")
50 mm	(2")	220 mm	(8.1/2")
55 mm	(2.1/8")	230 mm	(9")
60 mm	(2.3/8")	240 mm	(9.1/2")
65 mm	(2.5/8")	250 mm	(9.3/4")
70 mm	(2.3/4")	260 mm	(10")
75 mm	(3")	270 mm	(10.1/2")
80 mm	(3.1/8")	280 mm	(11")
85 mm	(3.1/4")	290 mm	(11.1/4")
90 mm	(3.1/2")	300 mm	(11.1/2")
95 mm	(3.3/4")	330 mm	(13")
100 mm	(4")	350 mm	(13.1/2")
110 mm	(4.1/4")	400 mm	(15.1/2")
115 mm	(4.1/2")	430 mm	(17")
120 mm	(4.3/4")	450 mm	(17.1/2")
125 mm	(4.7/8")	500 mm	(19.1/2")

Nota: Valores referenciales, medidas disponibles sujeto a stock.

BARRA PERFORADA

NORMA EN 10294-1

Especificaciones Generales:

Norma: EN 10294-1

Descripción: Barra perforada de alta resistencia de acero con aleación de vanadio (0.12%), que le otorga una mayor resistencia que otros aceros de bajo carbono en estado natural, de fácil maquinado y soldabilidad.

Aplicaciones: Ejes, bujes, cilindros, cajas de engranes y conectores, flechas, equipos para minería y petróleo, espaciadores, cilindros de exhibición, entre otros.



COMPOSICIÓN QUÍMICA					
%C	%Mn	%Si	%V	%S	%P
0,22	0,16	0,35	0,12	0,04	0,03

DIMENSIONES	DESDE		HASTA	
	INTERIOR	30mm	65 mm	
	EXTERIOR	50mm	115mm	
	LONGITUD	5,85 mts	7 mts	

PROPIEDADES MECÁNICAS			
RESISTENCIA MECÁNICAS	PUNTO DE FLUENCIA	ELONGACIÓN Min %	DUREZA HB
650/800	<16mm - 480 >16- 30mm - 460 >30mm - 440	18	-240



Vigas - Planchas - Tubos - Angulos - Canales - Válvulas - Fittings

Tubisa sac

PLANCHAS DE ACERO ESTRUCTURAL LAMINADAS EN CALIENTE ASTM A 36/A 36M

Descripción

Productos planos, que se obtienen por laminación en caliente, a partir de planchones de acero estructural.

Usos

Estructuras metálicas, equipos mineros, tolvas, autopartes, tanques de almacenamiento, vigas, puentes, torres de alta tensión, silos, etc.

Normas Suministradas y Composición Química

NORMA TECNICA	C %	Mn %	Si %	P %	S %	TIPO DE ACERO
ASTM A 36/A 36M	0.26 máx	1.20 máx	0.4 máx	0.04 máx	0.05 máx	RESISTENCIA MEDIA

Propiedades Mecánicas

NORMA TECNICA	Límite de Fluencia			Resistencia a la Tracción			Elongación	
	Kg/mm ²	ksi	Mpa	Kg/mm ²	ksi	Mpa	Probeta 2"	Probeta 8"
ASTM A 36/A 36M	25.3 mín	36 mín	250 mín	41 - 56	58 - 80	400 - 550	23 % mín	20% mín

Dimensiones y Pesos Teóricos

SISTEMA METRICO			SISTEMA INGLES, REFERENCIAL			PESOS TEORICOS			AREA DE PLANCHAS	
Espesor mm	Ancho mm	Largo mm	Espesor	Ancho pie	Largo pie	kg/plancha	kg/m ²	kg/pie ²	m ²	pie ²
1.5	1200	2400	1/16"	4	8	33.91	11.78	1.09	2.88	31.0
1.8	1200	2400	9/128"	4	8	40.69	14.13	1.31	2.88	31.0
2.0	1200	2400	5/64"	4	8	45.22	15.70	1.46	2.88	31.0
2.2	1200	2400	11/128"	4	8	49.74	17.27	1.60	2.88	31.0
2.3	1200	2400	12/128"	4	8	52.00	18.06	1.68	2.88	31.0
2.4	1200	2400	3/32"	4	8	54.26	18.84	1.75	2.88	31.0
2.5	1200	2400	3/32"	4	8	56.52	19.63	1.82	2.88	31.0
2.7	1200	2400	7/64"	4	8	61.04	21.20	1.97	2.88	31.0
2.9	1200	2400	1/8"	4	8	65.56	22.77	2.11	2.88	31.0
3.9	1200	2400	5/32"	4	8	88.17	30.62	2.84	2.88	31.0
4.0	1200	2400	5/32"	4	8	90.43	31.40	2.92	2.88	31.0
4.4	1200	2400	3/16"	4	8	99.48	34.54	3.21	2.88	31.0
4.5	1200	2400	3/16"	4	8	101.74	35.33	3.28	2.88	31.0

Tolerancias de Acuerdo al JIS G 3193

Anexo 5: Catálogo de resistencias tipo abrazadera



RESISTENCIA DE ABRAZADERA CON ELEMENTOS BLINDADOS

Al estar fabricadas con resistencias blindadas, la estanqueidad del elemento calefactor está asegurada en condiciones normales de utilización.

Al combinar la transferencia de calor por conducción con la de radiación, y teniendo en cuenta su elevada carga específica (de 6 a 10 W /cm²) se consiguen velocidades de calentamiento bastante elevadas.

La temperatura de trabajo alcanza hasta los 750 °C, y es posible un control de temperatura de la resistencia a través de termopares instalados en el interior de los elementos blindados.

Los elementos blindados pueden ser circulares o planos.

Se fabrican siempre sobre pedido

MODELOS ESTÁNDAR DBM



Fabricada a partir de modelo HOTSET MAXI WRP, (4,6 X 8,6 mm) su aplicación principal son las boquillas de inyección de plástico, pero su utilidad se amplía a otros usos industriales que requieran aporte de calor a superficies de forma cilíndrica, tuberías etc..

Conexiones: cables de teflón de 1000 mm. con cable de tierra y malla metálica

Potencia W a 230 V	Ø Int. mm.	L mm.	Salida	Termopar
300	30,0	30,0	Rad. 45°	-
400	30,0	38,0	Rad. 45°	-
350	32,0	30,0	Tang.	Fe-Co
500	38,0	32,0	Tang.	Fe-Co
450	40,0	30,0	Rad. 45°	-
350	42,0	22,0	Tang.	-
450	44,4	34,9	Tang.	-
500	50,0	34,0	Rad. 45°	-
350	50,8	25,4	Tang.	-

RESISTENCIA DE ABRAZADERA MODELO HERMÉTICO

Muy indicadas para boquillas de inyección y lugares propicios a la caída de materiales, debido a su construcción totalmente hermética.

Están fabricadas en tubo de latón, la capucha está soldada al cuerpo de la resistencia. Pueden incorporar un termopar.



Características.

Cable de conexión (2 conductores + tierra)

Longitud 500 mm.

Bajo demanda 1000, 1500 o 2000 mm.

Terminales de punta.

Tubo del cable de salida :25 mm,

Bajo demanda 20 o 40 mm.

Posición de la salida : Axial 45°

Bajo demanda Axial 0°, radial o

Tangencial

Tensión 230 V (otras bajo demanda)

Ø mm	Ancho						
	20	25	30	35	40	45	50
30	75	95	110 150	130	150	170	190
35	90	110	140	150	175	200	220
40	100	125	180	190	225	225	250
42	105	130	160	185	210	235	265
45	110	140	175	200	225	255	285
50	125	160	200	220	250	285	315
66	140	175	205	240	275	310	345
60	150	190	225	265	300	340	375
65	165	205	245	285	325	370	410
70	175	220	265	305	350	400	440
75	190	235	280	330	375	425	470
80	200	250	300	350	400	450	500
85	215	265	320	375	430	480	535
90	225	280	340	400	450	510	565
95	240	300	360	420	475	535	600
100	250	315	375	440	505	565	630

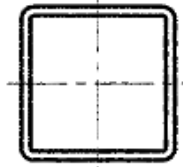
Potencia		Carcasa	Par nominal Tn (Nm)	Corriente con rotor trabado I/ In	Par con rotor trabado Tl/Tn	Par máximo Tb/Tn	Momento de Inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	440 V								Corriente nominal In (A)
								RPM	% de la potencia nominal											
									Rendimiento			Factor de potencia								
kW	HP							Caliente	Frio				50	75	100	50	75	100		
VI Polos - 1200 rpm - 60 Hz																				
0,12	0,16	63	1,01	3,3	2,4	2,4	0,00067	20	44	8,0	47	1130	36,0	42,0	46,3	0,46	0,52	0,58	0,585	
0,18	0,25	71	1,62	2,8	1,7	1,9	0,00056	31	68	10,0	47	1060	45,0	49,0	52,0	0,46	0,54	0,65	0,700	
0,25	0,33	71	2,23	2,8	1,9	2,0	0,00079	30	66	11,0	47	1070	48,0	54,0	58,0	0,43	0,52	0,63	0,900	
0,37	0,5	80	3,13	3,9	2,0	2,1	0,0021	10	22	14,0	47	1130	46,0	55,0	59,0	0,50	0,60	0,71	1,16	
0,55	0,75	80	4,65	4,5	2,2	2,4	0,0033	10	22	15,5	47	1130	58,0	61,0	66,0	0,46	0,57	0,71	1,54	
0,75	1	90S	6,34	5,2	2,2	2,5	0,0044	15	33	17,5	49	1130	68,0	73,0	73,0	0,48	0,62	0,72	1,88	
1,1	1,5	90S	9,30	5,3	2,5	2,7	0,0055	12	26	19,0	49	1130	71,0	74,5	75,1	0,46	0,60	0,70	2,75	
1,5	2	100L	12,6	5,3	2,1	2,6	0,0099	20	44	27,5	48	1140	75,5	77,5	78,0	0,50	0,62	0,70	3,60	
2,2	3	100L	18,4	5,0	2,1	2,4	0,0115	14	31	29,0	48	1140	76,7	78,5	78,6	0,52	0,64	0,72	5,10	
3	4	112M	25,1	5,1	1,9	2,4	0,0201	12	26	39,0	52	1140	81,5	82,0	81,5	0,56	0,69	0,76	6,35	
3,7	5	132S	30,5	5,9	1,9	2,5	0,0378	23	51	58,0	55	1160	81,5	83,5	83,7	0,52	0,65	0,72	8,06	
4,5	6	132S	37,1	5,9	1,9	2,4	0,0415	22	48	59,0	55	1160	82,0	84,0	84,3	0,53	0,66	0,73	9,60	
5,5	7,5	132M	45,3	6,1	2,0	2,5	0,0491	19	42	64,0	55	1160	83,5	85,0	85,2	0,55	0,67	0,74	11,4	
7,5	10	132M	61,8	6,5	2,1	2,5	0,0642	14	31	75,0	55	1160	85,1	86,2	86,3	0,56	0,68	0,75	15,2	
9,2	12,5	160M	75,1	5,6	2,0	2,4	0,1221	12	26	109	59	1170	86,0	87,5	87,7	0,62	0,75	0,81	17,0	
11	15	160M	89,8	6,0	2,0	2,5	0,1652	12	26	122	59	1170	87,2	89,0	89,2	0,64	0,76	0,82	19,7	
15	20	160L	122	6,1	2,3	2,7	0,1867	10	22	137	59	1170	87,5	89,3	89,6	0,61	0,74	0,80	27,5	
18,5	25	180L	151	7,0	2,2	2,7	0,2827	6	13	170	59	1170	89,5	90,3	90,3	0,71	0,82	0,87	30,9	
22	30	200L	179	6,0	2,1	2,3	0,4126	18	40	227	62	1175	90,5	91,1	91,1	0,75	0,81	0,85	37,3	
30	40	200L	244	6,0	2,2	2,4	0,4485	12	26	214	62	1175	90,4	91,6	91,8	0,64	0,76	0,82	52,3	
37	50	225S/M	300	6,8	2,1	2,5	1,08	11	24	374	64	1180	92,0	92,5	92,3	0,73	0,82	0,86	61,2	
45	60	250S/M	364	7,2	2,3	2,6	1,22	12	26	435	64	1180	92,2	92,7	92,6	0,72	0,82	0,86	74,1	
55	75	250S/M	443	7,4	2,5	2,7	1,37	11	24	475	64	1185	93,0	93,5	93,2	0,71	0,81	0,85	91,1	
75	100	280S/M	605	6,0	1,9	2,2	3,10	15	33	641	69	1185	93,0	93,6	93,3	0,70	0,80	0,84	126	
90	125	280S/M	729	6,0	2,0	2,3	3,68	12	26	678	69	1180	93,2	93,7	93,6	0,70	0,80	0,84	150	
110	150	315S/M	883	6,4	2,0	2,3	4,37	20	44	946	70	1190	93,4	94,3	94,3	0,68	0,79	0,83	184	
132	180	315S/M	1060	6,4	2,1	2,3	5,29	18	40	990	70	1190	93,5	94,4	94,4	0,70	0,79	0,83	221	
150	200	315S/M	1200	6,6	2,2	2,3	5,29	17	37	1044	70	1190	93,8	94,5	94,5	0,69	0,79	0,83	251	
185	250	315L	1490	6,7	2,4	2,4	9,53	13	29	1250	71	1190	94,0	94,6	94,6	0,70	0,79	0,83	309	
200	270	315L	1610	7,2	2,4	2,4	7,27	12	26	1305	71	1190	94,2	94,6	94,7	0,69	0,79	0,83	334	
220	300	315L	1770	7,6	2,6	2,6	11,0	11	24	1468	71	1190	94,3	94,7	94,8	0,68	0,78	0,83	367	
260	350	355M/L	2090	6,4	2,1	2,1	13,8	28	62	1769	77	1190	94,6	95,0	95,0	0,68	0,78	0,81	443	
300	400	355M/L	2410	6,3	2,2	2,1	14,8	26	57	1927	77	1190	94,7	95,2	95,2	0,67	0,77	0,80	517	
330	450	355M/L	2650	6,3	2,2	2,1	15,5	26	57	1989	77	1190	94,9	95,3	95,3	0,67	0,77	0,80	568	
370*	500	355M/L	2970	6,3	2,2	2,3	9,92	25	55	1989	77	1190	95,0	95,4	95,4	0,63	0,74	0,79	640	

Anexo 7: Catálogo de cajas reductoras



HSS4-HSS2

Table 1-12 (continued)
Square HSS
Dimensions and Properties



Shape	Design Wall Thickness, t	Nominal Wt.	Area, A	b/t	h/t	I	S	r	Z	Workable Flat	Torsion		Surface Area
											J	C	
	in.	lb/ft	in. ²			in. ⁴	in. ³	in.	in. ³	in.	in. ⁴	in. ³	ft ² /ft
HSS4×4×1/2	0.465	21.63	6.02	5.60	5.60	11.9	5.97	1.41	7.70	—	21.0	11.2	1.20
×3/8	0.349	17.27	4.78	8.46	8.46	10.3	5.13	1.47	6.39	2 ⁵ / ₁₆	17.5	9.14	1.23
×5/16	0.291	14.83	4.10	10.7	10.7	9.14	4.57	1.49	5.59	2 ⁵ / ₈	15.3	7.91	1.25
×1/4	0.233	12.21	3.37	14.2	14.2	7.80	3.90	1.52	4.69	2 ⁷ / ₈	12.8	6.56	1.27
×3/16	0.174	9.42	2.58	20.0	20.0	6.21	3.10	1.55	3.67	3 ³ / ₁₆	10.0	5.07	1.28
×1/8	0.116	6.46	1.77	31.5	31.5	4.40	2.20	1.58	2.56	3 ⁷ / ₁₆	6.91	3.49	1.30
HSS3 1/2×3 1/2×3/8	0.349	14.72	4.09	7.03	7.03	6.49	3.71	1.26	4.69	—	11.2	6.77	1.07
×5/16	0.291	12.70	3.52	9.03	9.03	5.84	3.34	1.29	4.14	2 ¹ / ₈	9.89	5.90	1.08
×1/4	0.233	10.51	2.91	12.0	12.0	5.04	2.88	1.32	3.50	2 ³ / ₈	8.35	4.92	1.10
×3/16	0.174	8.15	2.24	17.1	17.1	4.05	2.31	1.35	2.76	2 ¹¹ / ₁₆	6.56	3.83	1.12
×1/8	0.116	5.61	1.54	27.2	27.2	2.90	1.66	1.37	1.93	2 ¹⁵ / ₁₆	4.58	2.65	1.13
HSS3×3×3/8	0.349	12.17	3.39	5.60	5.60	3.78	2.52	1.06	3.25	—	6.64	4.74	0.900
×5/16	0.291	10.58	2.94	7.31	7.31	3.45	2.30	1.08	2.90	—	5.94	4.18	0.917
×1/4	0.233	8.81	2.44	9.88	9.88	3.02	2.01	1.11	2.48	—	5.08	3.52	0.933
×3/16	0.174	6.87	1.89	14.2	14.2	2.46	1.64	1.14	1.97	2 ³ / ₁₆	4.03	2.76	0.950
×1/8	0.116	4.75	1.30	22.9	22.9	1.78	1.19	1.17	1.40	2 ⁷ / ₁₆	2.84	1.92	0.967
HSS2 1/2×2 1/2×5/16	0.291	8.45	2.35	5.59	5.59	1.82	1.46	0.880	1.88	—	3.20	2.74	0.750
×1/4	0.233	7.11	1.97	7.73	7.73	1.63	1.30	0.908	1.63	—	2.79	2.35	0.767
×3/16	0.174	5.59	1.54	11.4	11.4	1.35	1.08	0.937	1.32	—	2.25	1.86	0.784
×1/8	0.116	3.90	1.07	18.6	18.6	0.998	0.799	0.965	0.947	—	1.61	1.31	0.800
HSS2 1/4×2 1/4×1/4	0.233	6.26	1.74	6.66	6.66	1.13	1.01	0.806	1.28	—	1.96	1.85	0.683
×3/16	0.174	4.96	1.37	9.93	9.93	0.953	0.847	0.835	1.04	—	1.60	1.48	0.700
×1/8	0.116	3.48	0.956	16.4	16.4	0.712	0.633	0.863	0.755	—	1.15	1.05	0.717
HSS2×2×1/4	0.233	5.41	1.51	5.58	5.58	0.747	0.747	0.704	0.964	—	1.31	1.41	0.600
×3/16	0.174	4.32	1.19	8.49	8.49	0.641	0.641	0.733	0.797	—	1.09	1.14	0.617
×1/8	0.116	3.05	0.840	14.2	14.2	0.486	0.486	0.761	0.584	—	0.796	0.817	0.633

Encendido

Previo al encendido de la extrusora se debe tomar en cuenta las condiciones de operación.

La temperatura del ambiente debe encontrarse entre 15 y 45 °C, la humedad del ambiente influye en la operación, esta debe ser de un 20% a un 80% de humedad relativa.

La máquina debe encontrarse lejos de lugares corrosivos e inflamables, lejos de solventes orgánico y de alta iluminación.

Procedimiento de encendido

- La extrusora tiene un flip-on general el cual se acciona para encender los controladores y energizar los demás componentes del sistema.
- En el panel de control se encuentran todos los switches de encendido y los interruptores que regulan las velocidades de trabajo de los diferentes motores, en él también se pueden observar amperajes, revoluciones de los motores en revoluciones por minuto (RPM) y las temperaturas de la extrusora.
- Graduar la temperatura de los controladores tomando en cuenta el tipo de polímero el cual puede ser de 200 °C para polímeros de alta densidad o 150 para los de baja densidad.
- El sistema de extrusión alcanza la temperatura de operación de 40 a 60 min. Una vez alcanzado estas temperaturas se recomienda esperar 10 minutos para asegurar la temperatura a lo largo del sistema de extrusión
- Comprobar la dirección del moto-reductor
- Depositar en la tolva 5 kg de materia prima para un proceso de una hora y verificar el flujo del polímero.

Proceso de apagado

- Sacar de la tolva la materia prima que ya no se procesará y colocarla en un saco e identificarla
- Cuando se observa a través de la tolva los hilos del husillo apagar los pirómetros y poner el potenciómetro del motor en 0 RPM.
- Apagar las resistencias y motores.
- Apagar el flip-on.

Anexo 10: Manual de mantenimiento

Lubricación				
Parte a lubricar	Método	Lubricante	Tiempo	Frecuencia en horas
Cambio de aceite-caja del reductor	Cambio	SP EP 220	60 min	4800
Rodamientos del sistema de rotación	Grasera	Esso Beacon	60min	2500
Eléctrico				
Revisar	Método	Tiempo	Frecuencia en horas	Detalle
Contactores	Solución dieléctrica	30 min	2500	Utilizar pulsera antiestática
Calibración de controladores PID de temperatura.	Programación	30 min	600	
Cables	inspección	30 min	600	Verificar continuidad
Mecánico				
Revisar	Tiempo	Frecuencia en horas	Método	Detalle
Cambio de rodamientos	2 h	4800		
Verificación de apriete de tornillería	30 min	2500	Torque	
Limpieza del dado	30 min	160	Rasqueteado	
Limpieza de camisa y tornillo extrusor	45 min	2500	Pulido	Utilizar crema para pulir
Limpieza general	60 min	24		Paño húmedo

Anexo 11: Circuito eléctrico

